

*See attached  
computer representation*

Requested Patent: JP2002175602A

Title: MAGNETIC RECORDER AND DESIGNING METHOD THEREOF ;

Abstracted Patent: JP2002175602 ;

Publication Date: 2002-06-21 ;

Inventor(s):

KIKITSU SATORU;; AKIYAMA JUNICHI;; KAI TADASHI;; NAGASE TOSHIHIKO;;  
MAEDA TOMOYUKI ;

Applicant(s): TOSHIBA CORP ;

Application Number: JP20010295112 20010926 ;

Priority Number(s): ;

IPC Classification: G11B5/02; G11B5/65; G11B5/673; G11B5/738; G11B11/10 ;

Equivalents: ;

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method capable of easily designing a magnetic recorder such that the high density recording is allowed over the thermal fluctuating limit. SOLUTION: When a thermal assist magnetic recorder provided with a magnetic recording medium, a heater and a magnetic head is designed, the stable preservation time  $t_{st}$  of the recording magnetization and a thermal fluctuation stabilizing coefficient  $\beta$  are calculated from  $\beta(T) = KuV/kBT$  (where  $Ku$  is the magnetic anisotropy energy density,  $V$  is the activated volume,  $kB$  is a Boltzmann's constant), and the equation  $\Delta t_{EQ} = \exp(1n(\Delta t - \beta + \beta_{st}))$  is defined to the medium temperature  $T$  in the specified time interval  $\Delta t$ , and the equivalent deterioration time  $t_{EQ}$  is obtained by the calculation from the equation  $t_{EQ} = \Sigma(\Delta t_{EQ})$  adding  $\Delta t_{EQ}$  over the time the deterioration of the recording magnetization is substantially generated, to obtain the equivalent deterioration time  $t_{EQ}$ , then the specification of the magnetic recording medium, the heater and the magnetic head are decided so as to satisfy the relation  $t_{EQ}$ .

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-175602

(P2002-175602A)

(43) 公開日 平成14年6月21日 (2002.6.21)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	フォーマット <sup>*</sup> (参考)
G 1 1 B	5/02	G 1 1 B	5/02 S 5 D 0 0 6
	5/65		5/65 5 D 0 7 5
	5/673		5/673 5 D 0 9 .1
	5/738		5/738
11/10	5 0 2	11/10	5 0 2 Z
審査請求 未請求 請求項の数20 O L (全 19 頁)			

(21) 出願番号 特願2001-295112(P2001-295112)

(22) 出願日 平成13年9月26日 (2001.9.26)

(31) 優先権主張番号 特願2000-296835(P2000-296835)

(32) 優先日 平成12年9月28日 (2000.9.28)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(72) 発明者 喜々津 哲

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株

式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 秋山 純一

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株

式会社東芝研究開発センター内

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

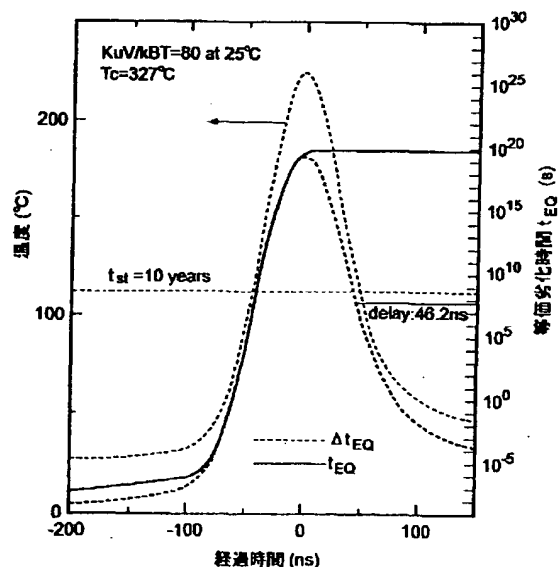
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気記録装置およびその設計方法

(57) 【要約】

【課題】 熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を簡便に設計できる方法を提供する。

【解決手段】 磁気記録媒体、ヒーターおよび磁気ヘッドを有する熱アシスト磁気記録装置を設計するにあたり、記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ 、および $\beta$  (T) =  $K_u V / k_B T$  から計算される熱揺らぎ安定係数 $\beta_{st}$ を決定し (ここで、 $K_u$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は活性化体積、 $k_B$ はボルツマン定数)、所定の時間刻み $\Delta t$ における媒体温度 $T$ に対して $\Delta t_{EQ} = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$ と定義して、実質的に記録磁化の劣化が起こる時間にわたって $\Delta t_{EQ}$ を加算する式 $t_{EQ} = \Sigma(\Delta t_{EQ})$ により計算して等価劣化時間 $t_{EQ}$ を求め、 $t_{EQ} < t_{st}$ の関係を満たすように磁気記録媒体、ヒーターおよび磁気ヘッドの仕様を決定する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 磁気記録層を有する磁気記録媒体と、磁気記録媒体を加熱する手段と、磁気記録媒体に磁界を印加する手段とを具備し、前記磁気記録媒体は、室温において要求される記録磁化の安定保存時間が $t_{st}$ 、温度 $T$ における熱揺らぎ安定係数 $\beta(T) = KuV/k_B T$ （ここで、 $Ku$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は活性化体積、 $k_B$ はボルツマン定数）から計算される、室温における熱揺らぎ安定係数が $\beta_{st}$ であり、かつ、前記磁気記録媒体は、所定の時間刻み $\Delta t$ における $\Delta t_{EQ}$ を $\Delta t_{EQ} = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$ （ここで、 $\beta$ は各時間刻み $\Delta t$ における磁気記録媒体の温度 $T$ に対する熱揺らぎ安定係数）と定義して、磁気記録媒体が実質的に記録磁化の劣化が起こる温度に保持されている時間にわたって $\Delta t_{EQ}$ を加算する式 $t_{EQ} = \sum(\Delta t_{EQ})$ により計算される等価劣化時間 $t_{EQ}$ を示し、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ と前記等価劣化時間 $t_{EQ}$ が、 $t_{EQ} < t_{st}$ の関係を満たすことを特徴とする磁気記録装置。

【請求項2】 実質的に記録磁化の劣化が起こる温度が、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上と定義されることを特徴とする請求項1に記載の磁気記録装置。

【請求項3】 前記時間刻み $\Delta t$ は、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上の温度に磁気記録媒体が保持されている時間を $10$ 等分した値 $t_i$ を求め、 $t_i$ が $1 \sim 10$  nsの場合には $t_i$ 、 $t_i$ が $10$  nsを超える場合には $10$  ns、 $t_i$ が $1$  ns未満の場合には $1$  nsに設定されることを特徴とする請求項1に記載の磁気記録装置。

【請求項4】 前記 $\Delta t_{EQ}$ は、磁気記録媒体の任意の記録トラック上において磁化転移が形成された後の時刻において加算されることを特徴とする請求項1に記載の磁気記録装置。

【請求項5】 前記室温における熱揺らぎ安定係数 $\beta_{st}$ が $60$ 以上であり、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ が $5$ 年間以上であることを特徴とする請求項1に記載の磁気記録装置。

【請求項6】 前記磁気記録媒体は、非磁性基板上に、磁性体からなる機能層と、磁性粒子とその間に存在する非磁性体とを含み垂直磁気異方性を示す磁性体からなる磁気記録層とをこの順に積層した構造を有し、前記機能層は、記録動作時の加熱されている部分において、

(1) 磁気記録層の磁化が反転している領域の直下に、磁化が反転した領域を有し、かつ(2) 垂直方向の残留磁化成分を持つという条件を満たすことを特徴とする請求項1に記載の磁気記録装置。

【請求項7】 前記磁気記録層と前記機能層との間に厚

さ $1$  nm以上の非磁性層が設けられていることを特徴とする請求項6に記載の磁気記録装置。

【請求項8】 前記機能層が室温において面内磁化膜であることを特徴とする請求項6または7に記載の磁気記録装置。

【請求項9】 前記機能層が室温において面内磁化膜であり、転移温度 $T_s$ 以上で垂直磁化膜となり、かつ前記転移温度 $T_s$ が記録動作時の機能層の最高到達温度よりも低いことを特徴とする請求項8に記載の磁気記録装置。

【請求項10】 前記機能層が室温において垂直磁化膜であり、室温 $T_R$ での残留磁化 $M_r(T_R)$ と室温よりも高い温度 $T_s$ における残留磁化 $M_r(T_s)$ との間に $M_r(T_s) > M_r(T_R)$ または $M_r(T_s)$ と $M_r(T_R)$ の向きが逆転するという関係があり、かつ温度 $T_s$ が記録動作時の機能層の最高到達温度以下であることを特徴とする請求項6または7に記載の磁気記録装置。

【請求項11】 前記機能層が希土類-遷移金属合金であることを特徴とする請求項10に記載の磁気記録装置。

【請求項12】 前記機能層は、互いにキュリー温度が異なる磁性体で形成された第一機能層と第二機能層とを反強磁性交換結合するように積層したユニットを含み、かつ前記ユニットが $1$ 回以上繰り返されていることを特徴とする請求項10に記載の磁気記録装置。

【請求項13】 前記機能層/磁気記録層のユニットが $1$ 回以上繰り返して積層されていることを特徴とする請求項6乃至12のいずれかに記載の磁気記録装置。

【請求項14】 磁気記録媒体と、前記磁気記録媒体を加熱する手段と、前記磁気記録媒体に磁界を印加する手段とを具備し、前記磁気記録媒体は、非磁性基板上に、磁性体からなる機能層と、磁性粒子とその間に存在する非磁性体とを含み垂直磁気異方性を示す磁性体からなる磁気記録層とをこの順に積層した構造を有し、前記機能層は、記録動作時の加熱されている部分において、

(1) 磁気記録層の磁化が反転している領域の直下に、磁化が反転した領域を有し、かつ(2) 垂直方向の残留磁化成分を持つという条件を満たすことを特徴とする磁気記録装置。

【請求項15】 磁気記録層を有する磁気記録媒体と、磁気記録媒体を加熱する手段と、磁気記録媒体に磁界を印加する手段とを具備した磁気記録装置を設計するにあたり、前記磁気記録媒体について、室温における記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ 、および温度 $T$ における熱揺らぎ安定係数 $\beta(T) = KuV/k_B T$ （ここで、 $Ku$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は活性化体積、 $k_B$ はボルツマン定数）から計算される室温における熱揺らぎ安定係数 $\beta_{st}$ を決定し、前記磁気記録媒体について、所定の時間刻み $\Delta t$ における $\Delta t_{EQ}$ を $\Delta t_{EQ} = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-175602

(P2002-175602A)

(43) 公開日 平成14年6月21日 (2002.6.21)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード <sup>*</sup> (参考)
G 1 1 B	5/02	G 1 1 B	5/02 S 5 D 0 0 6
	5/65		5/65 5 D 0 7 5
	5/673		5/673 5 D 0 9 1
	5/738		5/738
	11/10	11/10	5 0 2 Z
	5 0 2		
審査請求 未請求 請求項の数20 O L (全 19 頁)			

(21) 出願番号 特願2001-295112(P2001-295112)

(22) 出願日 平成13年9月26日 (2001.9.26)

(31) 優先権主張番号 特願2000-296835(P2000-296835)

(32) 優先日 平成12年9月28日 (2000.9.28)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(72) 発明者 喜々津 哲

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株  
式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 秋山 純一

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株  
式会社東芝研究開発センター内

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

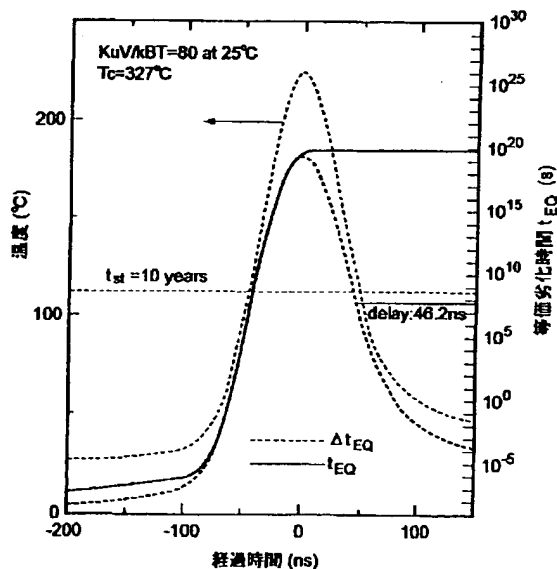
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気記録装置およびその設計方法

(57) 【要約】

【課題】 熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を簡便に設計できる方法を提供する。

【解決手段】 磁気記録媒体、ヒーターおよび磁気ヘッドを有する熱アシスト磁気記録装置を設計するにあたり、記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ 、および $\beta(T) = KuV/k_B T$ から計算される熱揺らぎ安定係数 $\beta_{st}$ を決定し(ここで、 $Ku$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は活性化体積、 $k_B$ はボルツマン定数)、所定の時間刻み $\Delta t$ における媒体温度 $T$ に対して $\Delta t_{EQ} = \exp(-\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$ と定義して、実質的に記録磁化の劣化が起こる時間にわたって $\Delta t_{EQ}$ を加算する式 $t_{EQ} = \sum(\Delta t_{EQ})$ により計算して等価劣化時間 $t_{EQ}$ を求め、 $t_{EQ} < t_{st}$ の関係を満たすように磁気記録媒体、ヒーターおよび磁気ヘッドの仕様を決定する。



(ここで、 $\beta$ は各時間刻み $\Delta t$ における磁気記録媒体の温度 $T$ に対する熱揺らぎ安定係数)と定義して、磁気記録媒体が実質的に記録磁化の劣化が起こる温度に保持されている時間にわたって $\Delta t_{\text{EQ}}$ を加算する式 $t_{\text{EQ}} = \sum (\Delta t_{\text{EQ}})$ により計算して等価劣化時間 $t_{\text{EQ}}$ を求め、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{\text{st}}$ と前記等価劣化時間 $t_{\text{EQ}}$ が、 $t_{\text{EQ}} < t_{\text{st}}$ の関係を満たすように、前記磁気記録媒体、前記加熱手段および前記磁界印加手段の仕様を決定することを特徴とする磁気記録装置の設計方法。

【請求項16】 実質的に記録磁化の劣化が起こる温度が、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上と定義されていることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項17】 前記時間刻み $\Delta t$ は、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上の温度に磁気記録媒体が保持されている時間を $10$ 等分した値 $t_i$ を求め、 $t_i$ が $1 \sim 10 \text{ ns}$ の場合には $t_i$ 、 $t_i$ が $10 \text{ ns}$ を超える場合には $10 \text{ ns}$ 、 $t_i$ が $1 \text{ ns}$ 未満の場合には $1 \text{ ns}$ に設定されることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項18】 前記 $\Delta t_{\text{EQ}}$ は、磁気記録媒体の任意の記録トラック上において磁化転移が形成された後の時刻において加算されることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項19】 前記熱揺らぎ安定係数 $\beta_{\text{st}}$ が $60$ 以上であり、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{\text{st}}$ が $5$ 年間以上であることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項20】 前記加熱手段がレーザであり、前記磁界印加手段が磁気ヘッドであり、レーザと、磁気ヘッドの記録ギャップとの距離を調整することを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は磁気記録装置およびその設計方法に関する。

【0002】

【従来の技術】近年のコンピュータの処理速度向上に伴って、情報の記憶・再生を行う磁気記憶装置(HDD)には高密度化が要求されている。しかし、高密度化には物理的な限界がある。

【0003】HDD装置の磁気記録媒体は微細な磁性粒子の集合体からなる磁気記録層を有する。高密度磁気記録を行うには磁気記録層に記録される磁区のサイズを小さくする必要がある。小さな記録磁区の各々を明確に分別するためには磁区の境界が滑らかであることが必要であり、そのためには磁性粒子を小さくし、かつ磁性粒子を互いに磁気的に分断する必要がある。また、磁化転

移幅を小さくするために磁気記録層の膜厚も小さくする必要がある。したがって、磁気記録層を構成する、磁氣的に互いに独立した磁性粒子の体積を小さくする必要がある。しかし、磁性粒子を微小化すると、磁気異方性エネルギー(磁気異方性エネルギー密度 $K_u \times$ 磁性粒子体積 $V$ )が熱揺らぎエネルギーよりも小さくなり、いったん記録されたスピンの向きを保持することができなくなってしまう。これは熱揺らぎ限界、あるいは超常磁性限界(super-paramagnetic limit)と呼ばれている。

【0004】熱揺らぎを避けるには単純には $K_u$ を大きくすることが考えられる。しかし、磁気記録媒体に反転磁区を形成する(記録する)ときの保磁力 $H_c$ は $K_u$ にほぼ比例するので、このような媒体に充分な記録を行うには大きな記録磁界が必要である。ここで、記録磁界を決定するヘッド磁極材料の特性はほぼ物理限界に達しており、現状以上の記録磁界は期待できない。すなわち、単に $K_u$ を大きくするだけでは高密度化の要求に応えることができない。

【0005】そこで、磁気記録媒体を加熱している間に磁界を印加して記録を行う、いわゆる熱アシスト磁気記録方式の磁気記録装置が提案されている。この方式では、記録時に媒体を局所加熱することにより、その領域の $K_u$ を小さくして磁気記録を行うので、室温での $K_u$ が大きい媒体でも現状の磁気ヘッドで記録が可能になる。しかし、このような磁気記録装置は従来の装置構成に加えて加熱手段を含んでいるため、最適設計のためのパラメータが増加し、装置の試作および記録/再生試験を通して仕様を決定しようとすると膨大な研究を必要とする。また、記録時には隣接トラックが多少なりとも加熱されるため、隣接トラックにおいて熱揺らぎが加速されて記録磁区が消去される現象(クロスイレース)が起こる。また、記録直後のヘッド磁界がなくなった時点でも媒体はある程度加熱されていることから、同様に熱揺らぎが加速されて、一度形成された磁区の消失が起こる。これらの問題を解決するには、温度に対する $K_u$ の変化が記録温度近傍でできるだけ急峻な材料を用いる必要がある。しかし、現在開発が進んでいる $\text{CoCr}$ 系、 $\text{CoPt}$ 系磁性薄膜の $K_u$ の温度変化は概ねリニアであるので、トラック密度の向上、あるいは線記録密度の向上はそれほど期待できない。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を提供することにある。本発明の他の目的は、熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を簡便に設計できる方法を提供することにある。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の一態様に係る磁気記録装置は、磁気記録層を有する磁気記録媒体と、磁気記録媒体を加熱する手段と、磁気記録媒体に磁界を印

加する手段とを具備し、前記磁気記録媒体は、室温において要求される記録磁化の安定保存時間が $t_{st}$ 、温度 $T$ における熱揺らぎ安定係数 $\beta(T) = KuV/k_B T$  (ここで、 $Ku$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は活性化体積、 $k_B$ はボルツマン定数) から計算される、室温における熱揺らぎ安定係数が $\beta_{st}$ であり、かつ、前記磁気記録媒体は、所定の時間刻み $\Delta t$ における $\Delta t_{EQ}$ を $\Delta t_{EQ} = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$

(ここで、 $\beta$ は各時間刻み $\Delta t$ における磁気記録媒体の温度 $T$ に対する熱揺らぎ安定係数) と定義して、磁気記録媒体が実質的に記録磁化の劣化が起こる温度に保持されている時間にわたって $\Delta t_{EQ}$ を加算する式 $t_{EQ} = \Sigma(\Delta t_{EQ})$ により計算される等価劣化時間 $t_{EQ}$ を示し、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ と前記等価劣化時間 $t_{EQ}$ が、 $t_{EQ} < t_{st}$ の関係を満たすことを特徴とする。

【0008】本発明の他の態様に係る磁気記録装置は、磁気記録媒体と、前記磁気記録媒体を加熱する手段と、前記磁気記録媒体に磁界を印加する手段とを具備し、前記磁気記録媒体は、非磁性基板上に、磁性体からなる機能層と、磁性粒子とその間に存在する非磁性体とを含み垂直磁気異方性を示す磁性体からなる磁気記録層とをこの順に積層した構造を有し、前記機能層は、記録動作時の加熱されている部分において、(1) 磁気記録層の磁化が反転している領域の直下に、磁化が反転した領域を有し、かつ(2) 垂直方向の残留磁化成分を持つという条件を満たすことを特徴とする。

【0009】本発明の他の態様に係る磁気記録装置の設計方法は、磁気記録層を有する磁気記録媒体と、磁気記録媒体を加熱する手段と、磁気記録媒体に磁界を印加する手段とを具備した磁気記録装置を設計するにあたり、前記磁気記録媒体について、室温における記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ 、および温度 $T$ における熱揺らぎ安定係数 $\beta(T) = KuV/k_B T$  (ここで、 $Ku$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は活性化体積、 $k_B$ はボルツマン定数) から計算される室温における熱揺らぎ安定係数 $\beta_{st}$ を決定し、前記磁気記録媒体について、所定の時間刻み $\Delta t$ における $\Delta t_{EQ}$ を

$$\Delta t_{EQ} = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$$

(ここで、 $\beta$ は各時間刻み $\Delta t$ における磁気記録媒体の温度 $T$ に対する熱揺らぎ安定係数) と定義して、磁気記録媒体が実質的に記録磁化の劣化が起こる温度に保持されている時間にわたって $\Delta t_{EQ}$ を加算する式 $t_{EQ} = \Sigma(\Delta t_{EQ})$ により計算して等価劣化時間 $t_{EQ}$ を求め、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ と前記等価劣化時間 $t_{EQ}$ が、 $t_{EQ} < t_{st}$ の関係を満たすように、前記磁気記録媒体、前記加熱手段および前記磁界印加手段の仕様を決定することを特徴とする。

【0010】

【発明の実施の形態】以下、本発明をより詳細に説明する。本発明の磁気記録装置は、磁気記録層を有する磁気

記録媒体と、磁気記録媒体を加熱する手段と、磁気記録媒体に磁界を印加する手段とを具備し、磁気記録媒体が加熱されている間に磁界を印加して記録を行う、いわゆる熱アシスト磁気記録方式の磁気記録装置である。本発明の磁気記録装置は、室温において要求される記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ を満たす。また、本発明の磁気記録装置の設計方法では、要求される記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ を満たすように、磁気記録媒体、加熱手段および磁界印加手段の仕様を簡便に決定する。

【0011】図1に本発明の一態様に係る磁気記録装置を模式的に示す。磁気記録媒体は、基板1上に磁気記録層3を形成した構造を有する。後述するように、磁気記録層3に対して、図示しない下地層や保護層などを設けてもよい。この磁気記録装置では、磁気記録媒体上に磁界印加手段としての磁気ヘッド11が配置され、磁気記録媒体の下方に磁気ヘッド11の位置に対応するように加熱手段としてのレーザ12が配置されている。

【0012】図2に本発明の他の態様に係る磁気記録装置を模式的に示す。磁気記録媒体は基板1上に、機能層2および磁気記録層3をこの順に積層した構造を有する。後述するように、機能層2は熱アシスト磁気記録時に磁気記録層3に対して垂直方向の磁界(以下、サポート磁界という)を印加する機能を有する。この磁気記録装置では、磁界印加手段としての磁気ヘッドと、レーザなどの加熱手段とが一体的に設けられた記録ヘッド15が取り付けられている。記録ヘッド15は、その直下に局所的な磁界を印加するとともに局所的な加熱ができるようになっている。図1および図2のいずれでも、図示していない残りの部分は概ね従来のHDD装置と同様である。

【0013】磁気記録媒体の基板としては、金属、ガラス、セラミクスなどを用いることができる。

【0014】磁気記録層の材料には、飽和磁化 $I_s$ が比較的大きくかつ磁気異方性が大きいものが適している。この観点から、磁性金属材料としては例えばCo、Pt、Sm、Fe、Ni、Cr、Mn、BiおよびAlから選択される金属を含む合金が用いられる。これらのうちでは、結晶磁気異方性の大きいCo基合金、特にCoPt、SmCo、CoCrをベースとしたものや、FePt、CoPtなどの規則合金がより好ましい。具体的には、Co-Cr、Co-Pt、Co-Cr-Ta、Co-Cr-Pt、Co-Cr-Ta-Pt、Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>、Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub>、Co<sub>3</sub>Pt<sub>1</sub>などである。また、これらの他にも、Tb-Fe、Tb-Fe-Co、Tb-Co、Gd-Tb-Fe-Co、Gd-Dy-Fe-Co、Nd-Fe-Co、Nd-Tb-Fe-Coなどの希土類-遷移金属合金、磁性層と貴金属層の多層膜(Co/Pt、Co/Pdなど)、PtMnSbなどの半金属、Coフェライト、Baフェライトなどの磁性酸化物などから幅広く選択することができる。また、磁気特性

を制御する目的で、上記の磁性体をさらにFe、Niから選ばれる少なくとも1つ以上の元素と合金化させてもよい。また、これらの磁性体に、磁気特性を向上させるための添加物、例えばCr、Nb、V、Ta、Ti、W、Hf、Cr、V、In、Si、Bなど、またはこれらの元素と、酸素、窒素、炭素、水素の中から選ばれる少なくとも一つの元素との化合物を加えてもよい。

【0015】磁気記録層の磁気異方性は、従来のHDDで用いられてきた面内磁気異方性でも、光磁気記録で用いられてきたような垂直磁気異方性でも、両者を混合したものでよい。また、磁気記録層に磁性層と非磁性層との積層膜を用いることもできる。このような積層膜は、積層の状況によっては、磁気記録層全体としてフェリ磁性を示したり反強磁性となったりする場合があるが、例えば熱揺らぎを防ぐために実効的体積を増やし、かつ記録時には高分解能記録を劣化させないという観点から好ましい場合がある。もちろん、積層構造を持たないフェリ磁性体または反強磁性体を用いることもできる。

【0016】磁気記録層の厚さに特に制限はないが、高密度記録を考えると100nm以下が好ましく、50nm以下がより好ましく、20nm以下が更に好ましい。0.5nm以下になると薄膜を構成するのが困難になるので好ましくない。

【0017】磁気記録層の磁性粒子を分断化する方法としては、CrやTaやBやSiO<sub>2</sub>に代表される酸化物、窒化物などの非磁性の元素を添加して粒間に析出させてもよいし、半導体で使われるリソグラフィなどの技術を利用した人工的な加工によってもよいし、自己組織化するPS-PMMAなどのジブロックコポリマーをマスクとした自己組織化加工によってもよいし、粒子線照射などによる加工によってもよい。

【0018】図2の磁気記録媒体のように機能層と磁気記録層とを積層した構造を有し、機能層からの垂直方向のサポート磁界を利用する場合には、磁気記録層は垂直磁気異方性を示すことが好ましい。ただし、主たる磁気異方性が垂直であれば、同時に面内磁気異方性を持っていても構わない。垂直磁気異方性かどうかの判断は、通常的手法で磁化曲線を測定し、膜面垂直方向の残留磁化成分があればよい。

【0019】機能層と磁気記録層とを積層した構造を有する磁気記録媒体において、機能層は磁性体であれば特に限定されない。機能層の磁気異方性は面内、垂直、あるいはその混合いずれでも良い。機能層の厚さも特に制限はないが、1000nm以上は作製に時間がかかり、また膜応力による特性劣化や剥離が発生しやすくなるので好ましくない。0.1nm以下になると実質的に薄膜を構成できないので好ましくない。磁性体として機能層が満たすべき要件は磁気記録層と同じである。

【0020】機能層と磁気記録層とを積層した構造を有

する磁気記録媒体における熱アシスト磁気記録の動作を実現する主要因は、後述するように機能層と磁気記録層の静磁結合相互作用である。静磁結合相互作用とは機能層からの漏洩磁界が記録層に及ぶことを意味する。なお、機能層と磁気記録層の間に交換結合相互作用が働いていてもよい。静磁結合相互作用は交換結合相互作用と独立に働くので、交換結合の有無は静磁結合相互作用を主とする動作に関係がない。後述するように、記録時には磁気記録層と機能層が反転する必要があるため、この反転を補助するために交換結合相互作用は有用である。ただし、交換結合相互作用は低温ほど大きくなるので、室温で記録層における微細な反転磁区の保持を妨げる場合も想定され、そのような場合は好ましくない。

【0021】機能層と磁気記録層の交換結合は、スパッタ法等による一般的な媒体製造工程において、真空を破らずに引き続き成膜することで実現できる。交換結合の向きは、強磁性的であっても反強磁性的であっても構わない。そのような構成は記録層と機能層の界面の状態を制御することによって実現することができる。例えば部分的に磁性が変化した領域を有する、表面改質層あるいは物理/化学吸着層が形成されている、界面の結合状態がミクロな部分によって異なる、といった例が挙げられる。いずれにしても、記録層と機能層との間隙は理論的には数nm程度離れていても交換相互作用が及ぶので、交換結合が作用するのであれば機能層と磁気記録層の間に非磁性層があっても構わない。また、機能層と磁気記録層の間に別の磁性膜を入れることによっても交換結合力を制御できるので、静磁結合相互作用を損なわない限り、機能層と記録層の間に複数の磁性層が存在しても構わない。

【0022】また、磁気記録層の垂直磁気異方性Kuや活性化体積などの温度依存性を熱アシスト磁気記録に好ましくように調整する目的で、磁気記録層自体が交換結合多層膜もしくは非磁性体を間にはさんだ多層膜、またはこれらを複数積層した複合膜となっても構わない。これらの磁気記録層自体の構造による作用は、機能層との静磁結合相互作用とは独立である。従って、両方の作用をかけあわせることにより温度マージンの広い熱アシスト磁気記録ができる。ただし、多層膜または複合膜を用いると媒体構成が複雑になってコストがかかる欠点も有する。

【0023】磁気記録層または機能層の下に、磁性体または非磁性体からなる下地層を設けてもよい。磁性体からなる下地層は、記録/再生を改善するために、磁性薄膜中の磁区や記録/再生ヘッドと交換相互作用・静磁気相互作用を介して磁的に結合される。例えば記録層を垂直磁化膜とする場合、軟磁性膜を下地層とし、単磁極ヘッドで記録を行うことで、高密度の記録ができる。また、記録層が面内磁化膜の場合、軟磁性層を記録層の上あるいは下に設け、再生時に軟磁性層を飽和させる強度

の磁界を印加することによって、高密度の記録ができ、しかも熱揺らぎ耐性も向上する。

【0024】非磁性体からなる下地層は、磁性部や非磁性部の結晶構造を制御する目的、あるいは基板からの不純物の混入を防ぐ目的で設置される。例えば、所望の結晶配向を有する磁性部の格子間隔に近い格子間隔を持つ下地層を用いれば磁性部の結晶状態を制御することが可能である。また、所望の表面エネルギーを持ったアモルファス下地を用いることにより、磁性部または非磁性部の結晶性またはアモルファス性を制御する場合もある。下地層の下にさらに下地層を設けても構わない。その場合には、機能を分担させられるので効果が增加する。例えば、記録層の結晶粒を小さくする目的で粒径の小さなシード層を基板上に設け、その上に記録層の結晶性を制御する下地層を設ける手法が知られている。基板からの不純物の混入を防ぐ目的には、下地層として格子間隔が小さいかまたは緻密な薄膜を用いればよい。

【0025】磁性体または非磁性体の下地層は、上述したような両者の機能を兼ね備えていてもよい。すなわち、磁性下地層により磁性部の結晶性を制御するようにしてもよい。この場合には、記録／再生特性上の効果と結晶性上の効果とが相乗されるので、より好ましい。なお、下地層は、イオンプレーティング、雰囲気ガス中でのドーピング、中性子線照射などによって形成される基板の表面改質層であってもよい。この場合、追加的な薄膜堆積のプロセスがなくなるので、媒体製造上好ましい。

【0026】磁性体を加熱する手段は、記録温度に達する部分が局所的であれば、媒体の全面を加熱するものでも、媒体の一部を局所的に加熱するものでもよい。一般に、高密度磁気記録媒体を加熱すると熱揺らぎの影響が出て記録保持能（アーカイブ特性）が劣化し使用電力が増加するので、媒体の一部を局所的に加熱し、媒体の大部分は室温または室温以下の温度に保つことが好ましい。ただし、全面を加熱しても記録保持能が劣化しない

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-r \cdot t) \quad \dots (1)$$

$$r = A \cdot \exp(-\Delta E / (k_B \cdot T)) \quad \dots (2)$$

$$\Delta E = Ku \cdot V \cdot (2 \cdot Ku - H \cdot Ms) / (2 \cdot Ku)^2 \quad \dots (3)$$

ここで、 $N(t)$ は時間 $t$ が経過したときの反転した磁性粒子の個数、 $N_0$ は最初の磁性粒子の個数、 $A$ は頻度因子、 $\Delta E$ は活性化エネルギー、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温度、 $Ku$ は磁気異方性エネルギー密度、 $V$ は磁性粒子の体積、 $H$ は磁性粒子に印加されている全磁界、 $Ms$ は磁性粒子の飽和磁化である。

$$N(t)/N_0 = \exp(-A \cdot \exp(-KuV/(k_B \cdot T)) \cdot t) \quad \dots (4)$$

$A$ は約 $10^9$  ( $s^{-1}$ )であることが知られている。 $KuV \gg k_B T$ の場合、きわめて長い時間 $t$ が経過しない限り、ほとんど磁化反転が起こらないことを意味する。しかし、 $KuV \sim k_B T$ の場合、秒から年のオーダーの時間で磁化反転が起こるようになる。これが熱揺らぎと呼ばれる現象である。

ような媒体を用いたシステムでは、全面を加熱する方が低コストになって好ましい場合がある。

【0027】具体的な加熱手段は特に限定されない。高速かつ局所的な加熱を行うためには、光ディスクに用いられているようなレーザ、誘導加熱装置、および媒体に対する距離を制御できるように保持された電熱線のようなプローブ、電子線を放射するものなどが用いられる。より局所的な加熱を行うためには、レーザ光をレンズなどの光学系により媒体面上で絞込み方式、レーザ光を微小開口やソリッドイマルジョン (SIL) レンズを用いて近接場光とする方式、プローブ先端に微細なアンテナを形成してそこから誘導加熱を行う方式、加熱プローブの媒体対向部の形状をできる限り先鋭化する方式、電子線放出プローブの媒体対向部の形状をできる限り先鋭化する方式などが挙げられる。図1および図2に示したように、これらの加熱手段は、媒体の記録面側に設置してもよいし、その反対面側（基板側）に設置してもよい。

【0028】記録層に磁界を印加する手段は、通常のHDDで用いられているような浮上スライダの端面に誘導コイルと磁極からなる磁気回路を形成した磁気ヘッドでもよいし、永久磁石を設置してもよいし、媒体に磁性層をさらに追加して温度分布または光照射による磁化分布によって瞬時的・局所的な磁界を発生させてもよいし、情報の記録を行う磁性体層自身から発生する漏洩磁界を利用してよい。永久磁石を設置する場合には、永久磁石と媒体との距離を可変にする、永久磁石を微細化するなどの工夫によって、高速・高密度の磁界印加ができるようになる。

【0029】以下、本発明の原理を説明する。磁気記録層が磁気的に孤立した多数の磁性粒子を含んでいる場合、その磁化反転過程は熱活性型の現象であり、次式で記述されることが一般に知られている。

【0030】

【0031】磁気記録媒体の室温における記録磁化の保存時間を評価する場合、すでに磁化反転したスピンの保持を考えればよいので、簡単のために $H=0$ とする。時間 $t$ が経過したときに磁化反転する磁性粒子の比率 $N(t)/N_0$ は次式で記述される。

【0032】

【0033】たとえば IEEE Trans. Magn., Vol. 35, p. 4423 (1999) には、 $40 \text{ Gbits/in}^2$ の記録密度で記録磁化を10年間保持するには媒体の $KuV/k_B T$ が約60であることが要求されると記載されている。ただし、ハードディスクのライフサイクルを考慮すれば、室温で5年間保持している間の磁化の減少に起因す



る信号の低下が無視できれば、実用上問題のないレベルであると考えられる。また、記録磁化は記録直後に急激に劣化するが、その後の劣化は緩やかであるので、5年後と10年後で信号強度にそれほど差はない。このように記録磁化が安定に保存される時間を安定保存時間 $t_{st}$ と呼び、本明細書においてはその目標値を最低でも5年間と設定する。一方、IEEE Trans. Magn., Vol. 33, p. 978(1997) には、 $KuV/k_B T = 60$ の媒体では6ヶ月後にSN比が6dB低下したが、 $KuV/k_B T = 80$ の媒体では6ヶ月後でも信号劣化が見られなかったことが記載されている。これらの文献値を考慮すると、 $KuV/k_B T$ が60以上で、記録磁化を5年間保持できることが目標になる。

【0034】熱アシスト磁気記録時に磁気記録媒体の温度は、図3に示すような経時変化を示す。この場合、温度が上がった時点では $KuV \sim k_B T$ となり、熱揺らぎが大幅に加速される。ただし、媒体が高温になっている時間が短ければ、トータルの磁化反転量はわずかであり、結果として信号の劣化は少ない。したがって、熱アシスト磁気記録装置を設計する上では、高温になっている時間における熱揺らぎ量を、そのシステムで許容される範囲に抑えるような媒体の磁気特性および熱特性、加熱方法などが非常に重要になる。しかし、媒体、加熱手段および磁界印加手段の仕様を、装置の試作および記録/再生試験を通して決定しようとするとは膨大な研究を必要とする。そこで、装置の設計指針を簡便に得る方法が必要になる。

【0035】上記の(4)式は単純な線形結合ではないので、任意の温度応答 $T(t)$ および $Ku(T)$ に適用できるような解析式の導出は困難である。また仮に解析式を導出できたとしても、それは複雑な式になり、装置設計に用いるには実用的ではない。そこで本発明者らはまず、磁気記録媒体の温度の時間変化をある時間刻み $\Delta t$ で区切り、その間においては磁気記録媒体の温度が一定であるとして(4)式を適用し、その時間刻み内の反転量を見積もり、それを全時間で積算してトータルの反転量を見積もる、という方法を考えた。

【0036】ところが、微小な時間刻み $\Delta t$ 内での磁化反転量は極めて小さな値であり、単純な加算は困難であることがわかった。例えば、反転量の可否の判定に使用される目標値として、安定保存時間 $t_{st} = 5$ 年、 $KuV$

$$\begin{aligned} N(\Delta t)/N_0 &= \exp(-A \cdot \exp(-\beta) \cdot \Delta t) \\ &= \exp(-A \cdot \exp(-\beta_{st}) \cdot \Delta t_{eq}) \end{aligned}$$

と表される。 $\beta$ は各時間刻み $\Delta t$ における磁気記録媒体の温度 $T$ に対する熱揺らぎ安定係数である。この式から、 $\Delta t_{eq} = \Delta t \cdot \exp(\beta_{st}) / \exp(-\beta) = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$ が得られる。上記の $(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$ という量は、大きな有効桁数や精度保証計算を考慮しなくても扱うことができるオーダーの量である。こうして求めた

$/k_B T = 80$ を(4)式に代入すると、 $N(t)/N_0 = \exp(2 \cdot 10^{-18})$ という限りなく1に近い値が得られるにすぎない。これをより微小な時間刻みで計算して加算するとすれば、有効桁数を非常に大きく確保し、かつ精度保証計算の手法を使わなければならない。このため、このような手法は実用的であるとはいえない。

【0037】次に、 $N(t)/N_0$ という微小な反転量について、その自然対数 $\ln$ をとり、取り扱いが容易なオーダーに変換する方法を検討した。すなわち、

$$F \equiv -\ln(N(t)/N_0) = A \cdot \exp(-Ku \cdot V / (k_B T)) \cdot t$$

を定義した。こうすれば、安定条件の値は $F = 2 \cdot 10^{-18}$ であり、このオーダーであれば短い時間刻みでもかろうじて扱える。このようにして求めたある時間刻みでの $F$ の値を $\Delta F_i = \ln(\Delta D_i)$ とすると( $\Delta D_i$ は $i$ 番目の時間刻みでの反転量 $N(\Delta t_i)/N_0$ )、トータルの反転量は $\Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_3 + \dots$ であるので、トータルの $F$ の値 $F_{total}$ は $F_{total} = \ln(\Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_3 + \dots)$ となる。ところが、この $F_{total}$ を取り扱い容易なオーダーに変換した量 $\Delta F_i$ から算出するには、単純な加算ではなく複雑な計算が必要であるため、結局上記と同じ有効数字と精度の問題が生じる。

【0038】そこで、本発明者らはさらに検討を重ね、下記のように等価劣化時間 $t_{eq}$ という新たな概念を用いる方法が有効であることを見出した。等価劣化時間とは、ある時間刻み内で磁気記録媒体が一定の温度に保持されたときの記録磁化の劣化度合いを、それと同じ記録磁化の劣化を生じさせる磁気記録媒体の室温での保持時間で表した物理量である。この方法では、記録磁化の劣化量を直接算出しないので、劣化量を直接知ることとはできない。しかし、上記の等価劣化時間は通常の計算機の有効桁数で、かつ精度保証計算をしなくても扱える量である。しかも、各時間刻みにおける等価劣化時間を単純に加算することにより全体の等価劣化時間を見積もることができる。このため、簡便な方法で磁気記録装置の設計を行うことができる。

【0039】簡単のために、熱安定パラメータとして $KuV/k_B T = \beta(T)$ とおき、等価劣化時間 $t_{eq}$ を計算する基準となる室温での $\beta$ の値を $\beta_{st}$ とする。この場合、時間刻み $\Delta t$ において、(4)式は

$\Delta t_{eq}$ を必要な時間刻み分だけ単純に加算すれば、全体としての記録磁化の劣化量に対応する等価劣化時間 $t_{eq}$ が簡単に計算できる。すなわち、 $\beta_{st}$ の媒体を室温で放置したとき、記録磁化の劣化量が何秒(時間、年)分の劣化に相当するかが簡単にわかる。したがって、媒体やシステムの設計上要求される劣化量(一般に具体的な磁化量で示すことは困難である)を、そのシステムが要求

する保持時間という極めてわかりやすい指標で表すことができる。

【0040】磁気記録媒体の記録磁化が安定かどうかの判断は、システムに対する要求によって異なるが、一般的にある $\beta_{st}$ を有する磁気記録媒体について安定保存時間 $t_{st}$ という指標で表すことが可能である。 $\beta_{st}$ および $t_{st}$ の値は一般的に定義できるものではなく、用いるシステムによって千差万別である。上述したように、本発明においては、 $\beta_{st}$ が60以上で、 $t_{st}$ が5年間以上の磁気記録装置を想定している。本発明は、上記の値と目標として、安定保存時間 $t_{st}$ とトータルの等価劣化時間 $t_{eq}$  ( $=\Sigma \Delta t_{eq}$ ) が、 $t_{eq} < t_{st}$ という関係を満たし、熱アシストHDDシステムで要求される性能を達成できる磁気記録媒体を提供する。また、本発明では、この関係式を満たすように媒体、記録方式およびシステム全体の設計を行う。なお、通常は記録磁化が10%程度劣化しても許容できる範囲であるので、 $t_{st}/10 < t_{eq}$ という関係を満たせば十分である。

【0041】この方法では、時間刻み $\Delta t$ を、どの程度の時間に設定するかが考慮すべき問題となる。例えば、時間刻みを磁気記録媒体の温度上昇、最高温度到達、冷却の全ての過程でひとつしか取らなければ、等価劣化時間 $t_{eq}$ が過小評価されるのは明らかである。一般的には、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上の温度に磁気記録媒体が保持されている時間を10分割以上するのが妥当である。また、種々の記録条件、媒体条件での比較を行う場合には、時間刻み $\Delta t$ を10nsより小さい値にすると比較が容易になるため好ましい。上記の2つの $\Delta t$ のうち小さい方の値を $\Delta t$ として採用すれば、過小評価を避けることができるため好ましい。しかし、基礎となる式に用いられる定数Aの逆数の値がnsのオーダーであるので、時間刻み $\Delta t$ を1ns未満にすると本発明による手法の利点が小さくなるので好ましくない。したがって、加熱された磁気記録媒体のある位置での最高到達温度を $T_{max}$ 、室温を $T_R$ としたとき、磁気記録媒体が $(T_R + (T_{max} - T_R)/10)$ 以上の温度に保持されている時間を10等分した値 $t_i$ を求め、 $t_i$ が1~10nsの場合には $\Delta t = t_i$ 、 $t_i$ が10nsを超える場合には $\Delta t = 10ns$ 、 $t_i$ が1ns未満の場合には $\Delta t = 1ns$ に設定することが好ましい。

【0042】上記の関係式 $t_{eq} < t_{st}$ を満たす磁気記録装置の設計に影響を与える具体的なパラメータとしては、下記のようなものが挙げられる。たとえば、磁気記録媒体の温度の時間変化 $T(t)$ 、ヒーターから与える熱量、記録周波数、ディスク回転数、ヒーターと磁気ヘッドとの距離などの装置上の制御パラメータ、および磁気記録層のKu(T)などの媒体上の制御パラメータなどである。

【0043】磁気記録媒体の温度の時間変化 $T(t)$ を制御するには、通常の光記録媒体で行われているような方法を用いることができる。たとえば、磁気記録層に対して熱伝導率の大きなヒートシンク層を積層することにより、 $dT/dt$ を大きくなる方向に変化させることができる。逆に、磁気記録層に対して断熱性の誘電体層を積層することによって、 $dT/dt$ を小さくなる方向に変化させることができる。また、レーザ加熱を行う場合には光の吸収率と膜厚を設計して、光の吸収を起こさせる層を複数設けて $dT/dt$ を小さくさせることもできる。さらに、レーザ加熱を行う場合には、照射パワー、ビーム径、照射パターン(連続、パルス)などによって媒体の $T(t)$ を調整することができる。また、レーザビームに対する媒体の移動速度も調整パラメータとなりうる。従来のHDD装置のように移動速度を任意に変更できないようなシステムの場合には、移動速度に対して照射パワーまたはパルス間隔を変えることにより $T(t)$ を調整することができる。誘導加熱の場合にも同様の手法を用いることができる。時間に対して加熱方法を変化させてもよい。

【0044】磁気記録層のKu(T)は、基本的には材料系の選択により制御することができる。また、Ku(T)は、磁気記録層への磁性体または非磁性体の添加、または磁気記録層の微細構造の変化によっても制御できる。また、キュリー点が最高到達温度よりも高いフェリ磁性体を用いれば、温度変化に対するKuの変化が小さい磁気記録層を実現することができる。さらに、いくつかの磁気特性の温度依存性がそれぞれ異なる磁気記録層(フェリ、フェロ、反強磁性体など)を複数積層して交換結合または静磁結合させることによって、より複雑な磁気特性の温度依存性を実現することができる。

【0045】以上の議論においては、磁性粒子間に作用する漏洩磁界を無視している。これは、漏洩磁界が微細構造に敏感な量であり、LLGシミュレータのような第一原理的なシミュレーションを用いない限り、評価が困難な物理量であるからである。設計を詳細に最適化する段階ではこのようなシミュレーションを用いることが必要であるが、本発明による磁気記録装置の設計方法はその前段階において、簡便な設計指針を得る方法を提供するものである。

【0046】本発明による磁気記録装置および設計方法においては、 $\Delta t_{eq}$ の加算は、磁気記録媒体の任意の記録トラック上において磁化転移形成後の時間に対して行えば十分である。以下、この点について説明する。記録動作時には、局所的に加熱された部位に対して磁気ヘッドを用いて記録を行っているので、記録が行われている過程では磁気記録媒体が熱揺らぎ加速された状態あるいは常磁性になっている状態であってもよい。しかし、磁気ヘッドが媒体上の記録すべきポイントまたは磁化転移を形成すべきポイントの上を通り過ぎた後には、ただち

に熱揺らぎを小さくして磁化の向きを固定しなければならない。この条件が最も厳しいポイントは、記録トラック上で磁化転移が形成される位置である。磁化転移はヘッドから供給される磁界の向きが高速に反転することによって形成される。すなわち、磁化転移位置では、ヘッドがわずかに移動した後に、それまで供給されていた磁界の向きが急激に逆転するという変化が生じる。このとき、磁化転移位置の熱揺らぎが加速された状態のままであると、ヘッド磁界の反転の影響を強く受けて急峻な磁化転移を形成できなくなる。したがって、磁化転移が形成された直後に熱揺らぎ加速は低く抑えなければならない。この要求を満たすためには、磁気記録媒体の任意の記録トラック上において磁化転移形成後の時間に対して  $\Delta t_{EQ}$  を加算して得られた  $t_{EQ}$  が  $t_{EQ} < t_{st}$  の関係を満たしていればよい。

【0047】ところで、たとえばレーザー光を記録層の記録磁区の上で走査させて加熱する操作のみを行った場合には、その磁区は熱揺らぎが加速されて消磁されてしまうが、記録層が最高到達温度に達してから、磁化の劣化が許容できる温度にまで記録層が冷却されるまでの間に、磁気ヘッドから反転磁区を維持できる磁界が印加されていれば、システム上問題となるレベルの消磁が起こることはない。ただし、磁気ヘッドによる磁界の印加時間が長いと、高速な記録ができなくなるおそれがある。

【0048】そこで、本発明の他の実施形態では、図2に示したように垂直磁気異方性を示す記録層の下に設けた機能層から記録直後の記録層に対して反転磁区をサポートする方向に磁界（サポート磁界）を印加するようにしている。

【0049】上記のサポート磁界の発生は、記録直後における機能層の残留磁化の空間分布によるものである。機能層から発生した漏洩磁界の影響が記録層に及ぶので、このことを機能層と記録層とが静磁結合した状態であると言うことができる。記録動作時に機能層がサポート磁界を発生するためには、(1) 記録層の磁化反転領域の直下に機能層の磁化反転領域を存在し、かつ(2) 機能層が垂直方向の残留磁化成分を持つという2つの条件を満たすだけで十分である。残留磁化量や漏洩磁界の強度については一般に限定されるものではない。なぜならば、漏洩磁界強度は熱揺らぎ加速現象を抑える効果をもつが、どの程度抑えればよいのかは、そのシステムが採用している動作条件（媒体の線速度、加熱温度、記録磁界）や設定寿命（安定条件）によって異なるからである。

【0050】記録層と機能層との間に厚さ1 nm以上の非磁性層を設けてもよい。上述したように記録層と機能層との間には交換結合相互作用が働いていてもよい。ただし、機能層の磁化反転が容易に行える場合には、交換結合相互作用を敢えてなくす目的で、記録層と機能層の間に非磁性層を挟むことが好ましい。この非磁性層の厚

さは1 nm以上であれば交換結合相互作用をなくす目的を達成できるが、膜厚分布などによる不均一性をなくしてより確実に静磁結合のみとしたい場合には3 nm以上とするのが好ましい。非磁性体の材料は、 $\text{SiO}_2$  のような誘電体、Tiのような金属、Siのような半導体など特に限定されない。

【0051】以下、機能層の残留磁化の空間分布によって漏洩磁界が発生する過程について例を挙げて説明する。まず、機能層が室温において面内磁化膜であり、記録動作時の媒体温度近傍で媒体垂直方向に残留磁化を持つ場合について説明する。図4(A)に上記の機能層2と記録層3の磁化の状態を模式的に示す。図4(A)の機能層2および記録層3に示した矢印は各層中のスピンの向きを示す。図4(B)に機能層2における垂直方向の残留磁化  $M_{r\perp}$  の空間分布を模式的に示す。

【0052】図4(A)に示すように、加熱手段と磁気ヘッドを含む記録ヘッド15によって、記録層3および機能層2の点線で囲まれた部分が加熱されるとともに、白抜き矢印で示した方向の記録磁界が印加され記録層3は磁化反転を起こす。このとき、図4(B)のような垂直磁化の空間分布を示す機能層2は上向きに着磁された棒磁石と等価である。このため機能層2から記録層3に向かって図中のハッチングを施した矢印で示す方向の漏洩磁界が発生する。これが機能層2からのサポート磁界であり、このサポート磁界によって記録直後の熱揺らぎ加速による記録層3の磁化再反転を防ぐことができる。

【0053】図4(B)のような磁化の空間分布を示す機能層2は垂直方向の残留磁化成分を持つ。また、サポート磁界が記録層3のスピンを保持する方向に向くためには、機能層2は記録層3と同時に磁化反転することが好ましい。なぜならば、機能層2が磁化反転しないと漏洩磁界の発生方向が常に一定となりサポートの効果がなくなるからである。機能層2の磁化反転領域は必ずしも記録層3の磁化反転領域と同一位置で完全に重なっている必要はない。たとえば、機能層の磁化反転領域は記録層の磁化反転領域と比較して、小さくてもよいし大きくてもよい。また、記録層が磁化反転した領域の直下に少しでも機能層の磁化反転領域が存在していれば、記録層の熱揺らぎ加速による磁化再反転を防ぐことができるため、記録層の磁化反転領域と機能層の磁化反転領域とが若干ずれて一部分のみが重なりあってもよい。特に記録層3の加熱領域の中で最も高温になっている部分で熱揺らぎ加速が激しいので、その部分により強いサポート磁界が印加されるように、機能層2の磁化反転領域は記録層3の高温部分近傍であることが好ましい。

【0054】上記のように、室温において面内磁化膜であり、かつ記録動作温度で垂直方向の残留磁化を持つ機能層を用いる場合には、図4(B)に示したように加熱部分以外では機能層の垂直方向の磁化がゼロとなるので、効率的かつ強度の大きい漏洩磁界を発生できるので

好ましい。

【0055】また、機能層が室温において面内磁化膜であり、転移温度 $T_c$ 以上で垂直磁化膜となり、かつ転移温度 $T_c$ が記録動作時の機能層の最高到達温度よりも低いことが好ましい。この場合、強度の大きい漏洩磁界を効率的に発生できる。特に、機能層の加熱部分が垂直磁化膜になると、残留磁化成分が大きくなり漏洩磁界強度が増加するので好ましい。

【0056】次に、機能層が室温から記録温度以上の温度まで垂直磁化膜である場合について説明する。こうした記録動作時の全温度領域において垂直磁化膜である機能層について、加熱時における機能層の垂直方向残留磁化の空間分布とそれによって発生する漏洩磁界の一例を図5(A)および(B)に模式的に示す。この例は、記録動作時に機能層の最高到達温度が機能層のキュリー温度を超える場合を示している。図5(A)は記録ヘッドから上向きの記録磁界が印加されている場合、図5(B)は記録ヘッドから下向きの記録磁界が印加されている場合を示す。図中、ハッチングを施した矢印が漏洩磁界を示しており、矢印の長さが漏洩磁界の大きさを意味している。図5(A)および(B)に示されるように、記録磁界が上向きでも下向きでも、機能層からは下向きの漏洩磁界が発生する。

【0057】また、記録動作時の全温度領域において垂直磁化膜である機能層について、加熱時における機能層の垂直方向残留磁化の空間分布とそれによって発生する漏洩磁界の他の例を図6(A)および(B)に模式的に示す。この例は、記録動作時に機能層の最高到達温度が機能層のキュリー温度を超えない場合を示している。この場合も図5(A)および(B)と同様に、記録磁界が上向きでも下向きでも、機能層からは下向きの漏洩磁界が発生する。

【0058】いずれの場合でも図の右側に黒塗り矢印で示した大きさおよび方向(Aの漏洩磁界とBの漏洩磁界との中間の大きさで上向き)の一定のバイアス磁界を印加することによって、図4(B)の場合と同様に、熱揺らぎ劣化加速を抑えるサポート磁界を記録層に印加することができる。

【0059】このバイアス磁界はヘッドあるいは磁気記録装置から発生させてもよい。また、機能層の下に磁化反転を起こさないバイアス層を新たに設け、図4(B)と同様な残留磁化の空間分布を示すように配置すれば、加熱時のみに漏洩磁界によるバイアス磁界を印加できる。磁化反転を起こさないバイアス層材料としては、キュリー温度が媒体の最高到達温度よりも大きい材料、REリッチ組成の希土類-遷移金属合金、記録動作時の保磁力が記録磁界よりも大きい材料、など種々のものから選択することができる。

【0060】次に、機能層が室温において垂直磁化膜であり、室温 $T_R$ での残留磁化 $M_r(T_R)$ と室温よりも高い

温度 $T_c$ における残留磁化 $M_r(T_c)$ との間に $M_r(T_c) > M_r(T_R)$ の関係があり、かつ温度 $T_c$ が記録動作時の機能層の最高到達温度以下である場合について説明する。このような機能層は、加熱領域において垂直方向の残留磁化が温度と共に増加するような特性を持ち、より大きな漏洩磁界を発生できるので好ましい。

【0061】このような機能層について、加熱時における機能層の垂直方向残留磁化の空間分布とそれによって発生する漏洩磁界の例を図7(A)および(B)に模式的に示す。この場合、図5または図6の場合と違い、バイアス磁界なしでサポート磁界を発生することができ、また、図7(A)および(B)に示したように、記録磁界が上向きの場合と下向きの場合とで漏洩磁界の強度が異なることもありうる。システム上、この漏洩磁界の強度の差が問題となる場合には、図5または図6の場合と同様に、バイアス磁界を印加するようにしてもよい。

【0062】同様なことは、 $M_r(T_c)$ と $M_r(T_R)$ の符号が異なる場合にも当てはまる。その例を次に示す。まず、この場合の磁化の温度依存性は図8に示ようになる。室温の残留磁化を負とすると、記録動作が行なわれる近傍の高温領域では残留磁化が正である。このとき、磁化の空間分布とそれによる漏洩磁界の発生は図9

(A)および(B)のようになる。このとき注意しなければならないのは、上向き方向の記録磁界が印加されている場合には、記録動作が行なわれる高温領域では機能層の磁化は下向きとなっているため、反転磁区が形成される、ということである。逆に、下向き方向の記録磁界が印加されている場合には、同じ理由で反転磁区はできない。そして、これらの場合について、残留磁化の空間分布と漏洩磁界は図9(A)および(B)に示したようになる。すなわち、上向き記録磁界の場合には上向き漏洩磁界、下向き記録磁界の場合には下向き漏洩磁界となる。

【0063】上記のような機能層としては希土類-遷移金属合金が挙げられる。例えば、 $Tb-Fe$ 、 $Tb-Fe-Co$ 、 $Tb-Co$ 、 $Gd-Tb-Fe-Co$ 、 $Gd-Dy-Fe-Co$ 、 $Nd-Fe-Co$ 、 $Nd-Tb-Fe-Co$ などである。これらの材料は光磁気(MO)記録媒体として実用化されており、希土類リッチ組成、あるいは補償組成、あるいはTMリッチ組成でも補償組成近傍とすることで、図7のような温度と共に磁化が増加する特性が容易に得られるので好ましい。

【0064】また、機能層として、互いにキュリー温度が異なる磁性体で形成された第一機能層と第二機能層とを反強磁性交換結合するように積層したユニットを含み、かつこのユニットが1回以上繰り返されたものを用いてもよい。この場合、第一機能層および第二機能層の磁気特性は図10に示すような関係になる。図中の太線はトータルの磁化を示す。すなわち、両者のキュリー温

度が異なるために、トータルの磁化は低温から高温へ向かうにつれて増加するような変化を示す。このような機能層を用いれば、図7に示すような磁化の空間分布を容易に得ることができる。

【0065】第一機能層と第二機能層との間に反強磁性交換結合相互作用が働くようにするには、両者の間にたとえば厚さ5nm以下の非磁性層を挿入すればよい。非磁性層としては、例えばRu、Re、Rh、Ir、Tc、Au、Ag、Cu、Mn、Si、Cr、あるいはこれらの合金あるいは酸化物を用いることができる。

【0066】また、反強磁性体と言われるもののなかに、温度条件や結晶方位面などの条件によってはフェリ磁性を示す材料があり、このような材料も機能層として用いることができる。

【0067】反強磁性を示すものとしては、ネール温度が室温よりも高い反強磁性材料を薄膜化したものがある。たとえばFe、Cr、Coの合金で、具体的にはMn-Ni、Mn-Pd、Mn-Pt、Cr-Pd、Cu-Mn、Au-Mn、Au-Cr、Cr-Mn、Cr-Re、Cr-Ru、Fe-Mn、Co-Mn、Fe-Ni-Mn、Co-Mn-Fe、Ir-Mnなどがあり、また規則合金、具体的にはAuMn、ZnMn、FeRh、FeRhIr、Au<sub>2</sub>Mn、Au<sub>5</sub>Mn<sub>12</sub>、Au<sub>4</sub>Cr、NiMn、PdMn、PtMn、PtCr、PtMn<sub>3</sub>、RhMn<sub>3</sub>などがあり、この他にMn<sub>3</sub>Pt-N、CrMnPt、PdPtMn、NiO、CoOなどが知られている。

【0068】本発明の他の実施形態では、機能層/記録層からなるユニットが一回以上繰り返して積層されていてもよい。例えば、基板/下地/機能層/記録層/機能層/記録層という積層構造が挙げられる。この場合、漏洩磁界が記録層の両面から作用し、より大きな静磁結合が得られるため好ましい。ただし、このような積層構造では総膜厚が大きくなりがちであるので、1つのユニットに含まれる機能層あるいは記録層は薄いほうが好ましい。

【0069】

【実施例】(実施例1) 図11に示す構造を有する磁気記録装置を作製した。磁気記録媒体は、2.5インチのガラス基板21上に、厚さ100nmのSiO<sub>2</sub>からなる第1下地層22、厚さ140nmのZnOからなる第2下地層23、厚さ20nmのCoCrPtからなる磁気記録層24、厚さ10nmのカーボンからなる保護層25を順次積層した構造を有する。この磁気記録装置には通常のHDD装置で用いられるものと同様な、先端に記録/再生素子26を備えた磁気ヘッドを取り付けたスライダ27が設けられている。磁気記録媒体を回転させると、スライダ27および記録/再生素子26は磁気記録媒体上に浮上した状態で配置される。この磁気記録装置では、磁気記録媒体を4500rpmで回転させ

ると、30nmの浮上量が得られる。磁気記録媒体の下方には、記録/再生素子26の位置に対応するようにレーザ28が配置される。そして、媒体のガラス基板21側から、記録/再生素子26直下の磁気記録層24に対して、直径900nmに集光した波長641nmのレーザ光が照射される。

【0070】この磁気記録層は、Kuが $8 \times 10^6 \text{ erg/cc}$ 、保磁力Hcが4kOeであり、室温(25℃)における $\beta \text{ (T)} = KuV/k_B T$ の値(室温安定係数 $\beta_{st}$ )が80であった。この磁気記録層の保磁力の温度依存性を測定したところ、保磁力は温度に対してほぼリニアに減少し、保磁力Hcがほぼゼロとなる温度(キュリー点Tc)は600K(327℃)であった。

【0071】この磁気記録媒体を線速5m/sで回転させ、パワー5mWでレーザ光を連続照射したときの温度の変化を温度分布解析シミュレータで計算した。その結果を図12に示す。図12においては、点線で磁気記録媒体の温度変化を示す。また、磁気記録媒体の最高温度到達時をゼロとして経過時間を表示している。図12より、約50nsで磁気記録媒体の温度が上昇し、最高温度到達時から約100ns程度で磁気記録媒体が冷却されているのがわかる。

【0072】この磁気記録媒体を上記の条件で加熱し、時間刻み $\Delta t = 4.2 \text{ ns}$ で $\Delta t_{eq}$ を計算し、その積算( $t_{eq}$ )を計算した。図12においては、破線で $\Delta t_{eq}$ の変化、実線で積算した $t_{eq}$ の変化を示す。また、図12には、このシステムの安定保存時間 $t_{st} = 10$ 年のレベルを示す。

【0073】図12から明らかなように、上記のパワーでレーザ光を記録磁区上で走査させると、その記録磁区では熱揺らぎが加速されて消磁が起こる。一方、図12に示すように、少なくとも磁気記録媒体が最高温度に到達してから46.2ns経過するまでの間にヘッドから記録磁界が供給されていれば、その後の等価劣化時間 $t_{eq}$ は $t_{st} = 10$ 年よりも小さくなり、システム上致命的な消磁が起こることはない。このことは、加熱された磁気記録媒体が最高温度に到達する位置よりも後方(トレーリングエッジ側)にヘッドの記録ギャップを設けて磁化転移を形成するようにすれば、熱消磁を起こすことなく記録可能であることを意味する。このように、レーザ照射位置に対する記録ギャップの最適位置の設計指針を容易に得ることができる。

【0074】上記の計算結果を確認するために、上記の動作条件で単一周波数での記録実験を行った。まず、媒体基板面から照射するレーザスポットの位置を50nm刻み(10ns相当)でずらしながら順次記録を行い、レーザスポットの記録ギャップに対する相対距離と再生信号強度との関係を調べた。その結果、レーザスポットを記録ギャップ位置よりもトレーリング側に250nm(50ns相当)以上離れた場合にはCNRで30dB

以上の信号強度が得られたが、相対距離が200nm(40ns相当)以下の場合には信号強度が約10dBまで急激に低下した。なお、相対距離が250nm(50ns相当)以上では、距離が大きいくほど信号強度が低下した。これは、磁気記録媒体の温度上昇が小さいために十分な記録が行えなかったためと推定される。

【0075】次に、レーザスポットの位置を記録ギャップからトレーリングエッジ側に250nm(50ns相当)に設定して記録を行い、単一周波数で反転磁区を形成した。その後、記録磁界を印加せずにディスク一周分だけ上記と同じパワーでレーザ光を照射した。再生ヘッドで信号強度を調べたところ、信号強度はほぼノイズレベルにまで低下した。

【0076】(実施例2) 実施例1と組成が異なり、保磁力 $H_c$ がほぼゼロになる温度(キュリー点 $T_c$ )が500K(=227℃)である磁気記録層を用いた以外は、実施例1と同様の磁気記録装置を作製した。磁気記録層の $\beta_{st}$ は150であった。このシステムに要求される安定保存時間 $t_{st}$ は5年である。

【0077】この磁気記録装置について、実施例1と同様に記録実験を行った。図12と同様な解析を行った結果、記録時に必要な磁界印加時間(delay)は54.6nsであった。実際に、記録ギャップ-レーザスポット間の距離が300nm(60ns相当)以上で大きなCNRが得られた。

【0078】記録ギャップ-レーザスポット間の距離を最適に設定して単一周波数で記録した信号に対し、実施例1と同様に記録磁界を印加せずにレーザ光のみを照射する実験を行った。ただし、本実施例では照射パワーを変化させて、照射後の再生信号強度とパワーとの関係を調べた。

【0079】実験に先立って、本発明の方法で $t_{sq}$ を見積もった結果を図13に示す。図13から、システムの安定保存時間である $t_{st}$ =5年を満たす照射条件は、0.4mW以下であることがわかる。本実施例の磁気記録装置の安定条件は、5年経過後のCNRの低下が1.5dBと定義されている。

【0080】実験によれば、照射パワーとCNRの低下との関係は、0.5mWで2.5dB、0.4mWで1.8dB、0.3mWで1dBであり、本発明による設計の妥当性が示された。

【0081】実際に磁気記録装置を設計・試作する場合に、あらゆる条件下で実験を行い、得られたCNRのわずかな低下から仕様を決定することは、測定誤差も考慮すると非常に困難である。本実施例で示したように、本発明の方法を用いれば、簡便に設計指針が得られる。

【0082】(実施例3)  $SiO_2$ 下地層を省いて下地層を厚さ100nmの $ZnO$ のみとし、磁気記録層を厚さ20nmの $CoPt-O$ とした以外は、実施例1と同様の磁気記録装置を作製した。この磁気記録層は、保磁

力 $H_c$ がほぼゼロになる温度(キュリー点 $T_c$ )が1420K、 $\beta_{st}$ が150であった。このシステムに要求される安定保存時間 $t_{st}$ は5年である。

【0083】この磁気記録装置について、実施例2と同様に、熱アシスト磁気記録後にレーザ照射する実験を行った。ただし、本実施例では、クロススレーズ耐性を調べるために、レーザによる照射位置を初期記録トラックから10nm刻みで変位させ、再び初期記録トラックの位置に戻って再生を行い、信号強度の劣化を調べた。本実施例で用いられている磁気記録層は $\beta_{st}$ が比較的大きいため、クロススレーズ耐性が大きいことが予想された。

【0084】この磁気記録装置について、本発明の方法により、隣接トラックの熱揺らぎ加速(クロススレーズ)を見積もった結果を図14に示す。図14において、横軸はレーザ照射パワー(mW)、縦軸は熱揺らぎが加速されて磁化が消失(demagnetized)し、システムで規定した信号低下が発生して安定条件が満たされない領域を示す。図14では、照射されるレーザスポットと比較するために、この磁化消失領域の大きさをトラック中心からの距離すなわち磁化消失半径(nm)として記述している。

【0085】図14からわかるように、照射パワー3mWまでは磁化消失半径は0である。したがって、図13のように反転磁区直上にレーザ照射しても磁化消失は起こらない。ところが、照射パワーが4mWになると、トラック中心から約300nmの領域で磁化消失が起こる。

【0086】実際の熱アシスト磁気記録システムでは、反転磁区上で記録磁界を印加せずにレーザ照射のみを行う動作がなされることはない。しかし、記録動作を行っているときに、その熱で隣接トラックの磁化がダメージを受けることが問題になる。図14の結果から、レーザ照射パワー4mWで記録動作を行う場合には、少なくとも隣接トラックまでの距離(具体的には隣接トラックにある反転磁区のエッジまでの距離)を300nm以上に設定する必要があるという設計指針が得られる。

【0087】このような設計指針は、例えば磁気特性の異なる媒体を用いた場合にレーザ照射パワーのマージンをどの程度に設定すればよいか、というような具体的な設計要求に対して、パラメータを変えるだけで容易に計算することができる。これらの設計作業を実験のみで行うのは時間がかかり効率が悪いが、本発明の方法を用いれば設計作業を簡便に行うことができる。

【0088】(実施例4) 本実施例では、垂直磁気記録媒体に短いパルス光を照射したときの熱揺らぎについて検討した。ガラス基板/厚さ300nmの軟磁性下地膜/厚さ15nmの $CoCrPt$ 磁気記録層/厚さ2nmのカーボン保護層という構成の垂直磁気記録媒体を用意した。この磁気記録層は $\beta_{st}$ が80であり、保磁力 $H_c$

がほぼゼロになる温度(キュリー点 $T_c$ )が500K(=227℃)であった。

【0089】媒体を構成する各層の熱伝導率を直接知ることは困難であるが、下記の方法により推定した。この方法では、試料をヒートシンク上におき、液体窒素温度～数100℃まで温度を変化させる。各温度において、試料が加熱されない程度の弱いパワーで100 $\mu$ m径のレーザービームを照射し、反射率の温度依存性を調べる。次に、レーザービームを数 $\sim$ 1 $\mu$ mに絞って照射し、局所的な定常温度分布を発生させ、そのときの反射率を測定する。この結果を、シミュレーションで再現し、フィッティングによって各層の熱伝導率または単層とみなしたときに等価な熱伝導率を求める。用いたヒートシンク中で異なる雰囲気温度中でこの測定-シミュレーション作業を行うことによりフィッティングの精度を向上させることができる。この測定の結果、各層の熱伝導率はバルク値のおよそ10%であることが判明した。薄膜の熱伝導率はバルク値の数10%以下に低下することが知られているので、その付近の値を出発値としてフィッティングするか、または薄膜の熱伝導率をバルク値の10%と仮決めして、本発明による方法で $t_{RQ}$ 評価を行ってもそれほど大きな誤差は生じない。

【0090】上記のようにして求めた定数を用い、媒体を線速30m/sで回転させ、FWHM50nm、0.51mW、5nsのレーザーパルスで照射した場合の温度レスポンスを計算した。そのレスポンスに基づいて、本発明の方法により $t_{RQ}$ を評価した結果を図15に示す。図15においては、点線で磁気記録媒体の温度変化を示す。仮に、このシステムに要求される安定保存時間 $t_{st}$ を10年とすると、レーザー照射のみを行った場合には信号の劣化が起こる。ただし、少なくとも磁気記録媒体が最高温度に到達してから0.333ns経過するまでの間にヘッドから記録磁界が供給されていれば、それ以降は信号劣化が起こらない。したがって、記録ギャップ位置とレーザースポット位置をほぼ同位置に調整しておけば、温度分布により磁化転移を形成することも可能であることが示唆される。

【0091】このように、本発明の方法では、与えられた媒体に対する適切なシステム設計を簡便に行うことができる。

【0092】(実施例5)以下のようにして磁気記録媒体を作製した。2.5インチのガラス基板上に、厚さ30nmのTiシード層、厚さ30nmのNiFeCo機能層、厚さ10nmの( $Fe_{53}Pt_{47}$ )- $SiO_2$ 記録層、厚さ3nmのカーボン保護層を順次スパッタ法にて積層した後、潤滑剤を塗布した。機能層と記録層の堆積の間には、0.5PaのAr雰囲気中への1分間の暴露を施した。

【0093】記録層の微細構造を透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて調べたところ、主にFePtからなる柱

状の磁性結晶粒子(直径約5nm)が主にアモルファスの $SiO_2$ からなる非磁性部分で分断されている構造となっていた。記録層単独の磁気特性は、垂直方向に主たる磁化容易軸を有し、VSM測定および磁気トルク測定より磁気異方性エネルギー密度 $K_u$ が $6 \times 10^7$ erg/ccであると推定された。記録層の室温の保磁力は15kOeであった。同様に、機能層単独の磁気特性は、面内方向に主たる磁化容易軸を有し、保磁力は300Oeであった。ただし、膜垂直方向にも残留磁化成分を持ち、膜垂直方向のVSM測定で保磁力400Oe、残留磁化100emu/ccの特性をもつ。

【0094】この機能層は軟磁性下地層の役割も果たす。すなわち、単磁極ヘッドから出る磁束が下地層を通過してリターン磁極へ流れるので、記録磁界の効率がよくなり、印加磁界強度(記録磁界強度)が概ね2倍となる。この効果は、記録層に厚さ20nmのCoCrPtTaを用いて通常の垂直磁気記録を行う実験の際に、記録ヘッドに流す電流(起磁力)に対する再生信号強度およびオーバーライト値が機能層を付与することによって増加したことによっても確認した。

【0095】また、記録層と機能層とは静磁結合状態にあることもヒステリシスループから確認した。すなわち、模式的に図16に示すような特性が得られた。この図において $H_1$ は記録層の保磁力、 $H_2$ は機能層の保磁力である。記録層、機能層のヒステリシスはともに $H=0$ の軸に対して対称であり、 $H_2$ と $H_{22}$ は実質上ほとんど違いがなかった。一方、記録層と機能層とが強く交換結合している場合には、 $H_2$ と $H_{22}$ がともに $H>0$ の部分に入るような非対称なヒステリシスループとなる。

【0096】記録層は室温で15kOeの保磁力を持つので、通常の磁気記録ヘッドを用いて室温で記録することは不可能である。しかし、保磁力は温度と共に減少するので、ある温度まで加熱すると記録層も磁気記録が可能となる。同様に、機能層も保磁力は温度と共に減少するが、この例の機能層は室温で既に記録ヘッドで磁化反転を起こす程度の保磁力しか持っていない。従って、記録層が磁化反転する温度において機能層が磁化反転することは自明である。

【0097】上記の磁気記録媒体の動特性をHDDの記録/再生評価装置にて評価した。回転数は4500rpmで、単磁極ヘッドを用いた垂直磁気記録を行った。GMR素子を用いた再生ヘッドはギャップが110nmであった。浮上量と潤滑剤の厚さから磁気スペーシングは30nmと推定された。400kfc iの単一周波数記録をおこない、キャリア/ノイズ比(CNR)測定を行った。局所加熱には波長633nmのレーザーを用いた。レーザービームを基板裏面より外部低浮上レンズを介して機能層/記録層部分へ照射した。外部低浮上レンズと基板の両方でSILレンズとなるように設計を行い、機能層/記録層部分で焦点を結ぶようにした。レーザースポッ



トの直径はFWHMで約500nmである。精密なビエゾ素子によるヘッドの駆動で、光の照射位置と記録ヘッドのギャップ位置とを一致させた。

【0098】まずレーザを照射しないで磁気記録を試みた。再生信号はノイズがほとんどであり、十分な記録ができていないことがわかった。このことは記録層の保磁力とヘッドの記録能力から勘案して当然の結果である。次に、レーザを照射しながら記録を行った。別の実験とシミュレーションにより、あらかじめレーザ照射パワーと媒体の温度上昇の関係を調べておいた。レーザ照射パワーとCNRの関係を図17に実線で示す。レーザパワーの増加と共に再生信号が大きくなり、熱アシスト磁気記録ができていくことがわかる。高照射パワー側でCNRが減少傾向を示すのは、熱揺らぎ加速による磁区の再反転現象が起こっているものと推察される。点線は記録層単独の媒体についての結果である。照射パワーは同じ温度上昇をもたらすものに換算している。すなわち、Y軸方向のCNRの差は同じ媒体加熱温度によって得られるCNRの差である。これより明かなように、機能層があるおかげで熱揺らぎ加速現象が抑えられ、熱アシスト磁気記録により大きな信号が得られるようになった。ただし、過度に加熱すると熱揺らぎ加速がより進むので、もはや機能層によるサポート磁界では熱揺らぎ加速を抑えることができなくなり、信号強度は下がることになる。この例でのCNRの値そのものはシステム上十分な値とはいえないが、これは媒体構造やヘッド構造が大きな信号を得るために最適化されてはいないためである。しかしながら、本発明による磁気記録装置の有用性を示すには充分な例である。

【0099】(実施例6) 以下のようにして磁気記録媒体を作製した。2.5インチのガラス基板上に、厚さ5nmのNiAlシード層、厚さ5nmのTi下地層、厚さ20nmのRu下地層、厚さ10nmの(Co<sub>76</sub>Pt<sub>24</sub>)Cr<sub>10</sub>-O機能層、厚さ3nmのRu中間層、[0.3nmCo/0.43nmPt]<sub>6</sub>記録層、厚さ3nmのカーボン保護層を順次スパッタ法にて積層した後、潤滑剤を塗布した。記録層はCoとPtとを交互に6回繰り返して積層した、いわゆる磁性人工格子膜である。

【0100】記録層の微細構造をTEMを用いて調べたところ、主にCoとPtの多層膜からなる柱状の磁性結晶粒子(直径約6nm)が物理的に分断された微細構造が観察された。粒間物質は同定できなかったが、構成材料からアモルファスCo-Oであることが想定される。記録層と機能層の単独の磁気特性は、垂直方向に主たる磁化容易軸を有し、保磁力はそれぞれ11kOe、8kOeであった。記録層と機能層の保磁力の温度変化を調べたところ、図18に示すようになった。この図においてHwは記録磁界強度、Twは記録温度である。記録温度が機能層のキュリー温度よりも大きいので、記録動作時

に機能層は磁化反転する。従って、記録時の磁化の空間分布は図5のようになっていると想定される。機能層はキュリー温度近傍まで垂直磁化膜であるので、記録動作時の加熱されている部分において、キュリー温度に達していない部分は当然垂直方向の残留磁化を持つ。

【0101】これを実施例5と同様の磁気記録実験に供した。ただし、レーザ照射側に電磁石を設置し、常に3000eのバイアス磁界が印加されるようにした。その結果、図17の実線で示されるような特性が得られた。電磁石の極性を逆にすると再生信号はほとんど得られず、図17の点線のようにになった。

【0102】中間層として、5nmSiO<sub>2</sub>、3nmTi、または6nmSiを用いて同様の媒体を作製した。いずれの場合も、記録層と機能層とは静磁結合していることが確認された。記録実験でも上記と同様な結果が得られた。

【0103】また、NiAlシード層の下に、100nmのTb<sub>25</sub>Coバイアス層を挿入した媒体を作製した。このバイアス層はREリッチであり、またキュリー温度は400℃を超えと思われる(膜が結晶化してしまうために正確なキュリー温度の測定はできなかった)ので、本実施例において磁化反転することはない。しかも、加熱部分において図4に示すような磁化の局所的な分布が得られるので、常に一定方向・一定強度の磁界を媒体に印加できる。この媒体を上記と同様の記録実験に供した。ただし、今回は電磁石による磁界印加を行わなかった。その結果、図17の実線で示されるような特性が得られた。バイアス層が電磁石の代わりとなっていることが確認された。

【0104】(実施例7) 以下のようにして磁気記録媒体を作製した。2.5インチのガラス基板上に、厚さ70nmのSi下地層、厚さ20nmのGd<sub>24</sub>(Fe<sub>20</sub>Co<sub>80</sub>)機能層、厚さ5nmのSiN中間層、[0.28nmCo/0.4nmPd]<sub>6</sub>記録層、厚さ3nmのカーボン保護層を順次スパッタ法にて積層した後、潤滑剤を塗布した。

【0105】記録層の微細構造をTEMを用いて調べたところ、主にCoまたはPdからなる柱状の磁性結晶粒子(直径約7nm)が物理的に分断された微細構造が観察された。粒間物質は同定できなかったが、構成材料からアモルファスCo-Oであることが想定される。記録層単独の磁気特性は、垂直方向に主たる磁化容易軸を有し、保磁力が11kOeであった。機能層は室温では面内磁気異方性を示すが、転移温度T<sub>s</sub>=150℃以上の温度においては垂直磁化膜となった。記録層と機能層の保磁力の温度変化を調べたところ、図19に示すようになった。この図における保磁力は垂直方向を意味しているので、機能層は転移温度以下では保磁力ゼロとなる。この図より明かなように、T<sub>s</sub>以上で記録を行うようにすると、機能層は磁化反転しつつ垂直方向の残留磁化



を持つ状態となる。

【0106】また、実施例5と同様の磁気記録実験を行った。その結果、図17の実線で示されるような特性が得られた。

【0107】(実施例8) 以下のようにして磁気記録媒体を作製した。2.5インチのガラス基板上に、厚さ70nmのSiN下地層、厚さ30nmのTb<sub>25</sub>(Fe<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>)機能層、厚さ3nmのPt中間層、厚さ10nmの(Fe<sub>53</sub>Pt<sub>47</sub>)Cu<sub>10</sub>Cr<sub>12</sub>記録層、厚さ3nmのカーボン保護層を順次スパッタ法にて積層した後、潤滑剤を塗布した。

【0108】記録層の微細構造をTEMを用いて調べたところ、主にFePtからなる柱状の磁性結晶粒子(直径約5nm)が主にCrからなる非磁性部分で分断されている構造となっていた。Cuは膜中に概ね均一に分布していた。記録層単独の磁気特性は、垂直方向に主たる磁化容易軸を有し、保磁力が22kOeであった。機能層は垂直方向に主たる磁化容易軸を有し、保磁力が8kOeの希土類リッチの組成であった。記録層と機能層の保磁力の温度変化を調べたところ、図20に示すようになった。この図より明らかなように、T<sub>w</sub>以上で記録を行うようにすると、記録過程において機能層は磁化反転しかつ垂直方向の残留磁化を持つ。この機能層の磁化の温度依存性は図10において太線で模式的に示したようなものになった。このため、記録動作時の機能層からの漏洩磁界は図7のようになる。

【0109】また、実施例5と同様な磁気記録実験を行った。その結果、図17の実線で示されるような特性が得られた。

【0110】また、機能層として、厚さ0.6nmのCo<sub>90</sub>Cr<sub>10</sub>第一機能層、厚さ0.75nmのRu、と厚さ0.25nmのCo第二機能層、厚さ0.75nmのRuを含むユニットを4回積層したものを、上記と同様の磁気記録媒体を作製した。この機能層はCoCr磁性層とCo磁性層とが反強磁性結合した磁気構造を持っていることがヒステリシスループから確認された。また、キュリー温度は、CoCr単独では約500K、Co単独では1200Kである。従って、機能層単独の磁気特性の温度依存性は、このキュリー温度の差のために、室温ではCoCrドミナントであるのが高温域ではCoドミナントとなって、図10に示すようなフェリ磁性を示す。従って、上記の例と全く同様に熱アシスト磁気記録媒体に用いることができる。

【0111】第一機能層の厚さと第二機能層の厚さを変えた試料をいくつか作製し、同様の記録再生実験を行った。その結果、キュリー温度の小さい第一機能層の室温での飽和磁化の値が第二機能層よりも大きい試料のみ熱アシスト磁気記録が可能であることがわかった。この理由は、熱アシスト磁気記録の成否が、機能層の磁化が温度と共に増加することに本質的に起因することにある。

【0112】(実施例9) 実施例7と同一の材料を用い、機能層/記録層/機能層の順に積層した磁気記録媒体を作製した。機能層と記録層の間には厚さ5nmのSiNを挿入している。ヒステリシスループから、機能層と記録層は各々静磁結合していることがわかった。この媒体を実施例5と同様の記録再生実験に供したところ、図21に示すような結果が得られた。この図において、実線が実施例7の媒体、点線が本実施例の媒体である。図からわかるように、本実施例の媒体では高パワー照射時により大きな信号が出ており、熱揺らぎ劣化の加速が実施例7の場合よりさらに抑えられていることがわかる。また、より高温まで加熱できるので、反転磁区領域が広がることによって大きな再生信号が得られた。このことは、積層化により機能層からの漏洩磁界が2倍になったことによると考えられる。そこで、機能層の厚さを10nmにした媒体を作製して同様の記録再生実験に供した。その結果、図21の実線と概ね一致する特性が得られた。このことによっても、積層化によって静磁結合力(漏洩磁界強度)が増加したことが確認された。

【0113】

【発明の効果】以上説明したように本発明によれば、熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を簡便に設計できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施態様に係る磁気記録装置における、磁気記録媒体、磁気ヘッドおよびレーザの配置を模式的に示す図。

【図2】本発明の他の実施態様に係る磁気記録装置における、磁気記録媒体および記録ヘッドの配置を模式的に示す図。

【図3】磁気記録媒体の温度Tの時間変化を模式的に示す図。

【図4】本発明の一実施形態に係る磁気記録媒体を形成する記録層および機能層の磁化の向きと、機能層の磁化の空間分布と漏洩磁界を模式的に示す図。

【図5】本発明の他の実施形態に係る磁気記録媒体を形成する機能層の磁化の空間分布と漏洩磁界を模式的に示す図。

【図6】本発明の他の実施形態に係る磁気記録媒体を形成する機能層の磁化の空間分布と漏洩磁界を模式的に示す図。

【図7】本発明の他の実施形態に係る磁気記録媒体を形成する機能層の磁化の空間分布と漏洩磁界を模式的に示す図。

【図8】本発明の他の実施形態に係る磁気記録媒体を形成する機能層の磁化の温度依存性を模式的に示す図。

【図9】本発明の他の実施形態に係る磁気記録媒体を形成する機能層の磁化の空間分布と漏洩磁界を模式的に示す図。

【図10】本発明の他の実施形態に係る磁気記録媒体を

形成する第一機能層と第二機能層の磁化の温度に対する変化を模式的に示す図。

【図11】本発明の実施例1の磁気記録装置における、磁気記録媒体、磁気ヘッドおよびレーザの配置を模式的に示す図。

【図12】本発明の実施例1の磁気記録装置について、磁気記録媒体の温度、 $\Delta t_{EQ}$  および  $t_{EQ}$  の経時変化を示す図。

【図13】本発明の実施例2の磁気記録装置について、記録トラックからの距離と  $t_{EQ}$  との関係を、レーザの照射パワーをパラメータとして示す図。

【図14】本発明の実施例3の磁気記録装置について、レーザの照射パワーと磁化消失半径との関係を示す図。

【図15】本発明の実施例4の磁気記録装置について、磁気記録媒体の温度および  $t_{EQ}$  の経時変化を示す図。

【図16】本発明の実施例5の磁気記録媒体におけるヒステリシスループを模式的に示す図。

【図17】本発明の実施例5の磁気記録装置におけるCNRの照射レーザパワーに対する変化を示す図。

【図18】本発明の実施例6の磁気記録媒体を形成する記録層と機能層の保磁力の温度に対する変化を示す図。

【図19】本発明の実施例7の磁気記録媒体を形成する記録層と機能層の保磁力の温度に対する変化を示す図。

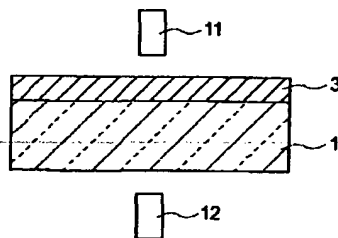
【図20】本発明の実施例8の磁気記録媒体を形成する記録層と機能層の保磁力の温度に対する変化を示す図。

【図21】本発明の実施例9の磁気記録装置におけるCNRの照射レーザパワーに対する変化を示す図。

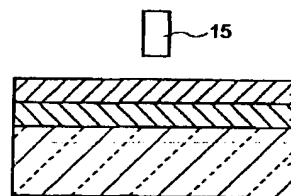
【符号の説明】

- 1…基板
- 2…機能層
- 3…磁気記録層
- 11…磁気ヘッド
- 12…レーザ
- 15…記録ヘッド
- 21…基板
- 22…第1下地層
- 23…第2下地層
- 24…記録層
- 25…保護層
- 26…記録/再生素子
- 27…スライダ
- 28…レーザ

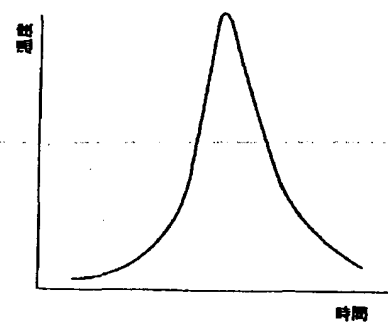
【図1】



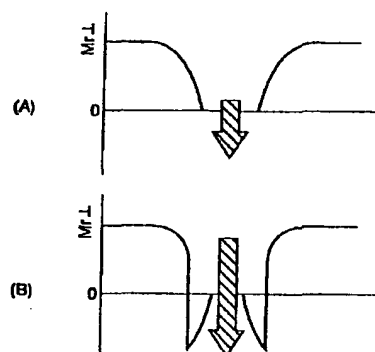
【図2】



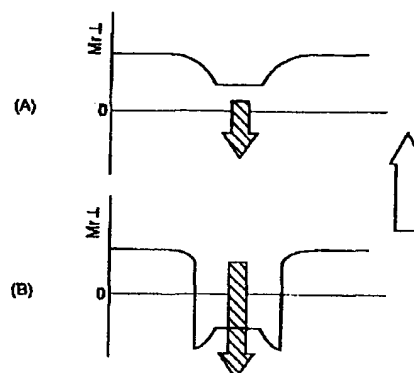
【図3】



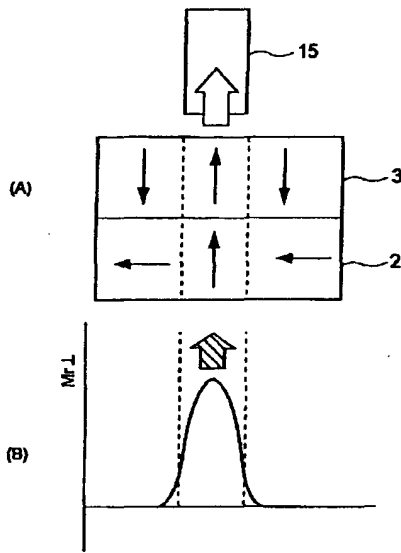
【図5】



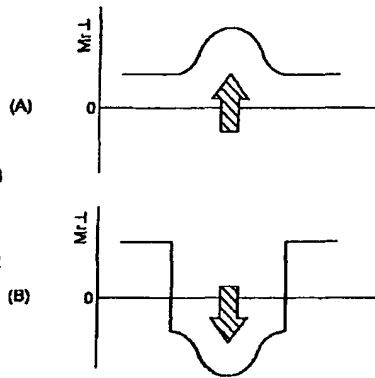
【図6】



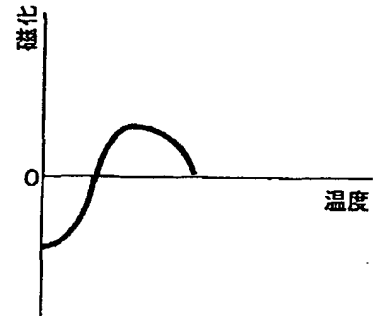
【图4】



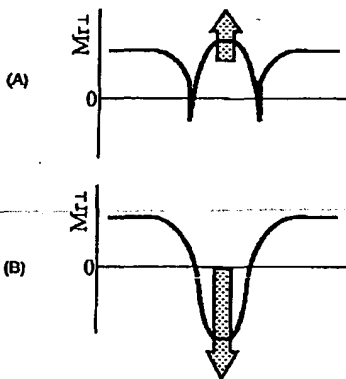
【图7】



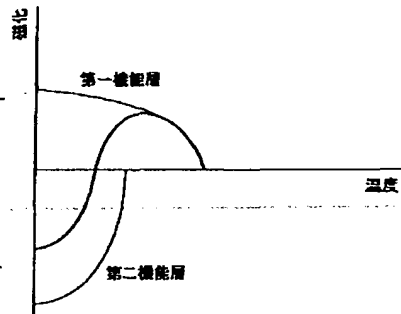
【图8】



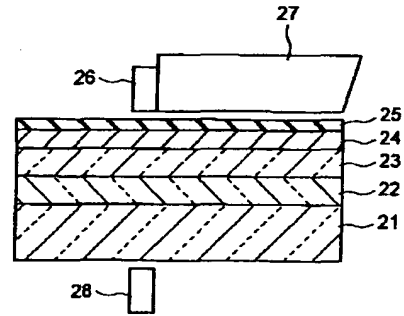
【图9】



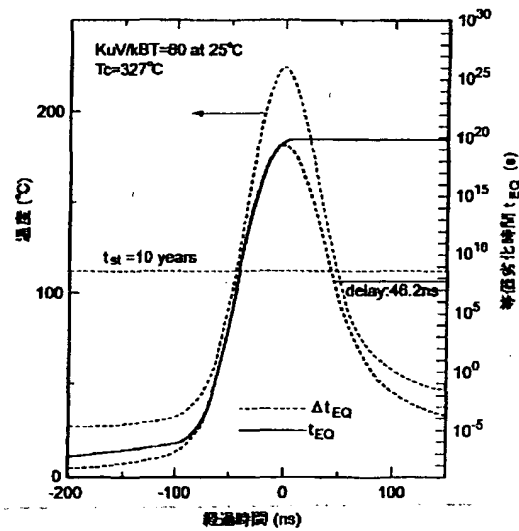
【图10】



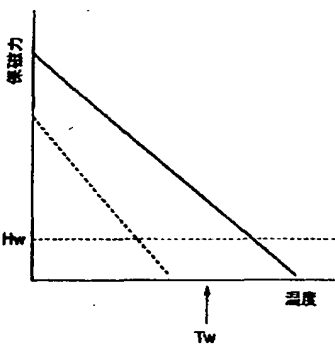
【图11】



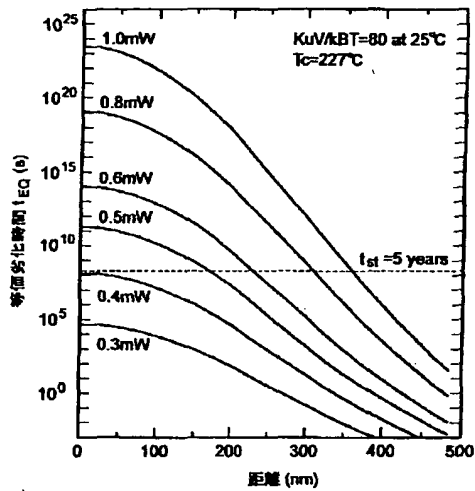
【图12】



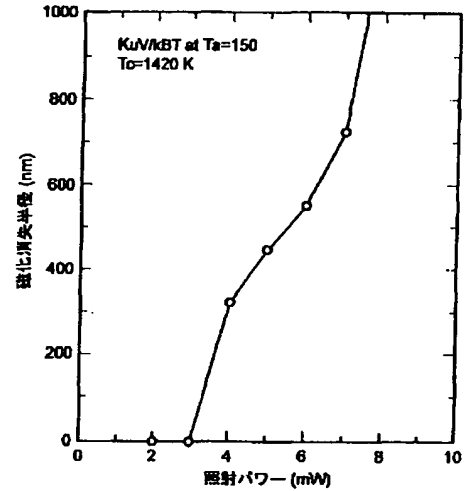
【图18】



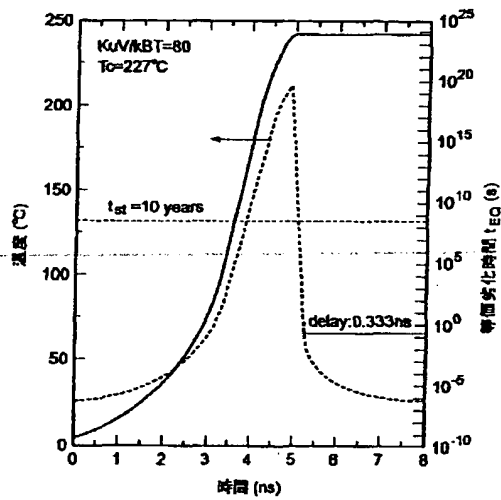
【図13】



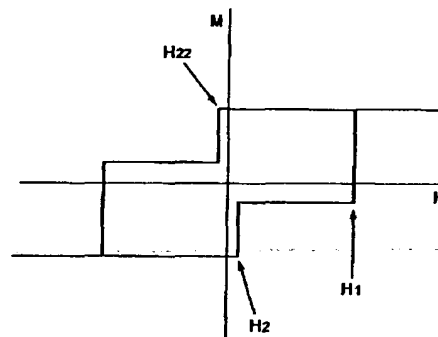
【図14】



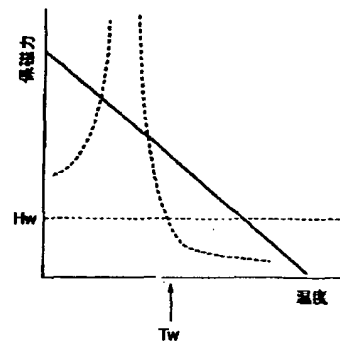
【図15】



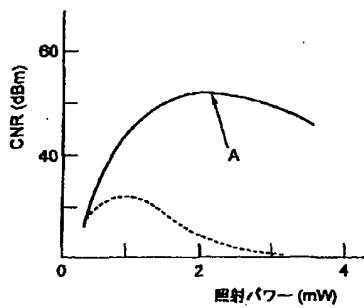
【図16】



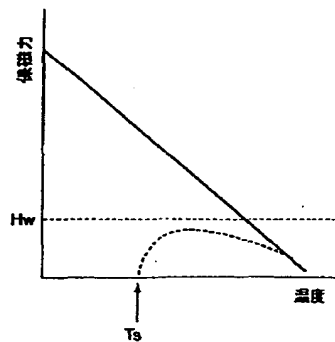
【図20】



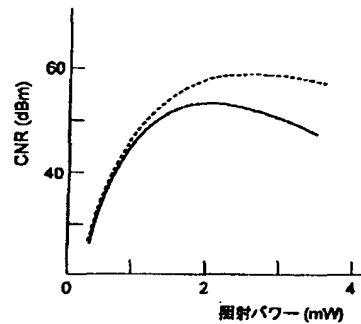
【図17】



【図19】



【図21】



フロントページの続き

(72)発明者 甲斐 正

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株  
式会社東芝研究開発センター内

(72)発明者 永瀬 俊彦

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株  
式会社東芝研究開発センター内

(72)発明者 前田 知幸

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株  
式会社東芝研究開発センター内

Fターム(参考) 5D006 BB01 CA05 DA03 DA08 FA00

5D075 CC39

5D091 AA10 CC02 CC26 HH20

(ここで、 $\beta$ は各時間刻み $\Delta t$ における磁気記録媒体の温度 $T$ に対する熱揺らぎ安定係数)と定義して、磁気記録媒体が実質的に記録磁化の劣化が起こる温度に保持されている時間にわたって $\Delta t_{sq}$ を加算する式 $t_{sq} = \sum (\Delta t_{sq})$ により計算して等価劣化時間 $t_{sq}$ を求め、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ と前記等価劣化時間 $t_{sq}$ が、 $t_{sq} < t_{st}$ の関係を満たすように、前記磁気記録媒体、前記加熱手段および前記磁界印加手段の仕様を決定することを特徴とする磁気記録装置の設計方法。

【請求項16】 実質的に記録磁化の劣化が起こる温度が、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上と定義されていることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項17】 前記時間刻み $\Delta t$ は、加熱された磁気記録媒体の温度プロファイルにおける最高到達温度と室温との温度差の $1/10$ を室温に加えた温度以上の温度に磁気記録媒体が保持されている時間を10等分した値 $t_i$ を求め、 $t_i$ が $1 \sim 10 \text{ ns}$ の場合には $t_i$ 、 $t_i$ が $10 \text{ ns}$ を超える場合には $10 \text{ ns}$ 、 $t_i$ が $1 \text{ ns}$ 未満の場合には $1 \text{ ns}$ に設定されることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項18】 前記 $\Delta t_{sq}$ は、磁気記録媒体の任意の記録トラック上において磁化転移が形成された後の時刻において加算されることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項19】 前記熱揺らぎ安定係数 $\beta_{st}$ が60以上であり、前記記録磁化の安定保存時間 $t_{st}$ が5年間以上であることを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【請求項20】 前記加熱手段がレーザであり、前記磁界印加手段が磁気ヘッドであり、レーザと、磁気ヘッドの記録ギャップとの距離を調整することを特徴とする請求項15に記載の磁気記録装置の設計方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は磁気記録装置およびその設計方法に関する。

【0002】

【従来の技術】近年のコンピュータの処理速度向上に伴って、情報の記憶・再生を行う磁気記憶装置(HDD)には高密度化が要求されている。しかし、高密度化には物理的な限界がある。

【0003】HDD装置の磁気記録媒体は微細な磁性粒子の集合体からなる磁気記録層を有する。高密度磁気記録を行うには磁気記録層に記録される磁区のサイズを小さくする必要がある。小さな記録磁区の各々を明確に分別できるためには磁区の境界が滑らかであることが必要であり、そのためには磁性粒子を小さくし、かつ磁性粒子を互いに磁氣的に分断する必要がある。また、磁化転

移幅を小さくするために磁気記録層の膜厚も小さくする必要がある。したがって、磁気記録層を構成する、磁氣的に互いに独立した磁性粒子の体積を小さくする必要がある。しかし、磁性粒子を微小化すると、磁気異方性エネルギー(磁気異方性エネルギー密度 $K_u \times$ 磁性粒子体積 $V$ )が熱揺らぎエネルギーよりも小さくなり、いったん記録されたスピンの向きを保持することができなくなってしまう。これは熱揺らぎ限界、あるいは超常磁性限界(super-paramagnetic limit)と呼ばれている。

【0004】熱揺らぎを避けるには単純には $K_u$ を大きくすることが考えられる。しかし、磁気記録媒体に反転磁区を形成する(記録する)ときの保磁力 $H_c$ は $K_u$ にほぼ比例するので、このような媒体に充分な記録を行うには大きな記録磁界が必要である。ここで、記録磁界を決定するヘッド磁極材料の特性はほぼ物理限界に達しており、現状以上の記録磁界は期待できない。すなわち、単に $K_u$ を大きくするだけでは高密度化の要求に応えることができない。

【0005】そこで、磁気記録媒体を加熱している間に磁界を印加して記録を行う、いわゆる熱アシスト磁気記録方式の磁気記録装置が提案されている。この方式では、記録時に媒体を局所加熱することにより、その領域の $K_u$ を小さくして磁気記録を行うので、室温での $K_u$ が大きい媒体でも現状の磁気ヘッドで記録が可能になる。しかし、このような磁気記録装置は従来の装置構成に加えて加熱手段を含んでいるため、最適設計のためのパラメータが増加し、装置の試作および記録/再生試験を通して仕様を決定しようとすると膨大な研究を必要とする。また、記録時には隣接トラックが多少なりとも加熱されるため、隣接トラックにおいて熱揺らぎが加速されて記録磁区が消去される現象(クロスイレース)が起こる。また、記録直後のヘッド磁界がなくなった時点でも媒体はある程度加熱されていることから、同様に熱揺らぎが加速されて、一度形成された磁区の消失が起こる。これらの問題を解決するには、温度に対する $K_u$ の変化が記録温度近傍でできるだけ急峻な材料を用いる必要がある。しかし、現在開発が進んでいるCoCr系、CoPt系磁性薄膜の $K_u$ の温度変化は概ねリニアであるので、トラック密度の向上、あるいは線記録密度の向上はそれほど期待できない。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を提供することにある。本発明の他の目的は、熱揺らぎ限界を超える高密度記録が可能な磁気記録装置を簡便に設計できる方法を提供することにある。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の一態様に係る磁気記録装置は、磁気記録層を有する磁気記録媒体と、磁気記録媒体を加熱する手段と、磁気記録媒体に磁界を印

\* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

PRIOR ART

[Description of the Prior Art] Densification is demanded of the magnetic storage (HDD) which performs informational storage and reproduction with the improvement in processing speed of a computer in recent years. However, there is a physical limitation in densification.

[0003] The magnetic-recording medium of HDD equipment has the magnetic-recording layer which consists of the aggregate of a detailed magnetic particle. It is necessary to make small size of the magnetic domain recorded by the magnetic-recording layer for performing high-density magnetic recording. It is necessary it to be required for the boundary of a magnetic domain to be smooth in order to be able to classify each of a small record magnetic domain clearly, and for that to make a magnetic particle small, and to divide a magnetic particle magnetically mutually. Moreover, in order to make magnetization transition width of face small, it is necessary to also make thickness of a magnetic-recording layer small. Therefore, it is necessary to make small volume of the magnetic particle which became independent mutually magnetically which constitutes a magnetic-recording layer. If a magnetic particle is made minute, an anisotropy energy (anisotropy-energy density  $K_u$  magnetic-particle volume  $V$ ) will become smaller than heat fluctuation energy, and it will become impossible however, to hold the sense of the once recorded spin. This is called the heat fluctuation limitation or superparamagnetism limitation (super-paramagnetic limit).

[0004] It is possible to enlarge  $K_u$  simply, for avoiding heat fluctuation. However, since the coercive force (it records)  $H_c$  when forming a reversal magnetic domain in a magnetic-recording medium is proportional to  $K_u$  mostly, it needs a big record magnetic field to perform sufficient record for such a medium. Here, the property of head magnetic pole material of determining a record magnetic field has reached the physical limitation mostly, and the record magnetic field beyond the present condition cannot be expected. That is, the demand of densification cannot be met only by enlarging  $K_u$ .

[0005] Then, while heating the magnetic-recording medium, the so-called magnetic recording medium of the heat assistant magnetic-recording method which records by impressing a magnetic field is proposed. Since  $K_u$  of the field is made small and magnetic recording is performed by this method by carrying out partial heating of the medium at the time of record, record becomes possible by the present magnetic head also by the medium with large  $K_u$  in a room temperature. However, since such a magnetic recording medium includes the heating means in addition to the conventional equipment configuration, the parameter for optimal design increases, and when it is going to determine specification through the trial production of equipment, and record/reproduction examination, it needs huge research. Moreover, since an adjoining track is somewhat heated at the time of record, the phenomenon (cross erasion) in which heat fluctuation is accelerated in an adjoining track and a record magnetic domain is eliminated happens. Moreover, even when the head magnetic field immediately after record is lost, heat fluctuation is accelerated similarly and disappearance of the magnetic domain formed at once arises from the medium being heated to some extent. In order to solve these problems, change of  $K_u$  to temperature needs to use the steepest possible material near the record temperature. However, since the temperature change of  $K_u$  of the CoCr system to which the present development is progressing, and a CoPt system magnetic thin film is linear in general, the improvement in track density or the improvement in track recording density is not so much expectable.

---

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

## CLAIMS

## [Claim(s)]

[Claim 1] The magnetic-recording medium which has a magnetic-recording layer, a means to heat a magnetic-recording medium, and a means to impress a magnetic field to a magnetic-recording medium are provided. the aforementioned magnetic-recording medium Heat fluctuation stability-factor  $\beta(T) = KuV/kBT$  [ in /  $t_{st}$  and temperature  $T$  / in the stable reserve time of the record magnetization demanded in a room temperature ] (here) It is  $\Delta t_{EQ}$  [ in /  $\Delta t$  / it cuts fine time predetermined / that the heat fluctuation stability factor in a room temperature by which anisotropy-energy density is calculated for  $Ku$  and a volume change of activation and  $kB$  are calculated for  $V$  from a Boltzmann's constant is  $\beta_{st}$  and / in the aforementioned magnetic-recording medium, and ]  $\Delta t_{EQ} = \exp(\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$

It is defined as (the heat fluctuation stability factor to the temperature  $T$  of a magnetic-recording medium [ in / each time serration  $\Delta t$  / here / in  $\beta$  ]). The equivalent degradation time  $t_{EQ}$  calculated by formula  $t_{EQ} = \sum (\Delta t_{EQ})$  which adds  $\Delta t_{EQ}$  over the time in which the magnetic-recording medium is held at the temperature to which degradation of record magnetization takes place substantially is shown. The magnetic recording medium with which the stable reserve time  $t_{st}$  of the aforementioned record magnetization and the aforementioned equivalent degradation time  $t_{EQ}$  are characterized by filling the relation of  $t_{EQ} < t_{st}$ .

[Claim 2] The magnetic recording medium according to claim 1 characterized by defining the temperature to which degradation of record magnetization takes place substantially more than as the temperature which added 1/10 of the temperature gradients of the highest attainment temperature and the room temperature in the temperature profile of the heated magnetic-recording medium to the room temperature.

[Claim 3] Cut fine the aforementioned time and  $\Delta t$  calculates the value  $t_i$  which divided the time in which the magnetic-recording medium is held at the temperature more than the temperature which added 1/10 of the temperature gradients of the highest attainment temperature and the room temperature in the temperature profile of the heated magnetic-recording medium to the room temperature into ten equally. The magnetic recording medium according to claim 1 characterized by being set as 1ns for 10ns when  $t_i$  is 1 - 10ns,  $t_i$  and  $t_i$  exceed 10ns, and  $t_i$  is less than 1ns.

[Claim 4] The aforementioned  $\Delta t_{EQ}$  is a magnetic recording medium according to claim 1 characterized by being added in the time after magnetization transition was formed on the arbitrary recording tracks of a magnetic-recording medium.

[Claim 5] The magnetic recording medium according to claim 1 characterized by for heat fluctuation stability-factor  $\beta_{st}$  in the aforementioned room temperature being 60 or more, and the stable reserve time  $t_{st}$  of the aforementioned record magnetization being more than for five years.

[Claim 6] The aforementioned magnetic-recording medium is stratum functionale which consists of the magnetic substance on a nonmagnetic substrate. The magnetic substance in which a perpendicular magnetic anisotropy is shown including a magnetic particle and the non-magnetic material which exists between them. It is the magnetic recording medium [ equipped with the above ] according to claim 1, and it has the field which magnetization reversed directly under the field which magnetization of (1) magnetic-recording layer has reversed, and is characterized by fulfilling the conditions of having the residual magnetization component of (2) perpendicular directions.

[Claim 7] The magnetic recording medium according to claim 6 characterized by preparing the non-magnetic layer with a thickness of 1nm or more between the aforementioned magnetic-recording layer and the aforementioned stratum functionale.

[Claim 8] The magnetic recording medium according to claim 6 or 7 with which the aforementioned stratum functionale is characterized by being a magnetization film within a field in a room temperature.

[Claim 9] The magnetic recording medium according to claim 8 which the aforementioned stratum functionale is a magnetization film within a field in a room temperature, and serves as perpendicular magnetic anisotropy films above transition temperature  $T_s$ , and is characterized by the aforementioned transition temperature  $T_s$  being lower than the highest attainment temperature of the stratum functionale at the time of record operation.

[Claim 10] The magnetic recording medium according to claim 6 or 7 which the aforementioned stratum functionale is perpendicular magnetic anisotropy films in a room temperature, and the relation between the residual magnetization  $M_r$  in a room temperature  $T_R$  ( $T_R$ ) and the residual magnetization  $M_r$  in the temperature  $T_x$  higher than a room temperature ( $T_x$ ) that the sense of  $M_r(T_x) > M_r(T_R)$  or  $M_r(T_x)$ , and  $M_r(T_R)$  is reversed is, and is characterized by temperature  $T_x$  being below the highest attainment temperature of the stratum functionale at the time of record operation.

[Claim 11] The magnetic recording medium according to claim 10 characterized by the aforementioned stratum functionale being a rare earth-transition-metals alloy.



[Claim 12] The aforementioned stratum functionale is a magnetic recording medium according to claim 10 characterized by repeating the aforementioned unit once or more, including the unit which carried out the laminating so that antiferromagnetism switched connection of the primary-function layer and the second stratum functionale which were formed with the magnetic substance with which Curie temperature differs mutually might be carried out.

[Claim 13] The magnetic recording medium according to claim 6 to 12 characterized by carrying out the laminating of the unit of the aforementioned stratum functionale / magnetic-recording layer repeatedly once or more.

[Claim 14] Magnetic-recording medium. A means to heat the aforementioned magnetic-recording medium. It is the stratum functionale to which a means to impress a magnetic field to the aforementioned magnetic-recording medium is provided, and the aforementioned magnetic-recording medium consists of the magnetic substance on a nonmagnetic substrate. The magnetic substance in which a perpendicular magnetic anisotropy is shown including a magnetic particle and the non-magnetic material which exists between them. It is the magnetic recording medium equipped with the above, and it has the field which magnetization reversed directly under the field which magnetization of (1) magnetic-recording layer has reversed, and is characterized by fulfilling the conditions of having the residual magnetization component of (2) perpendicular directions.

[Claim 15] MAG characterized by providing the following. The magnetic-recording medium which has a magnetic-recording layer. A means to heat a magnetic-recording medium. The stable reserve time  $t_{st}$  of record magnetization [ in / a room temperature / medium / magnetic-recording / aforementioned ] / and heat fluctuation stability-factor  $\beta(T) = KuV/kBT$  in temperature T (here) in designing the means recording device which impresses a magnetic field to a magnetic-recording medium It is  $\Delta tEQ$  [ in /  $\Delta t$  / heat fluctuation stability-factor  $\beta_{st}$  in the room temperature / density / anisotropy-energy ] by which Ku is calculated and a volume change of activation and kB are calculated for V from a Boltzmann's constant is determined, and it cuts fine predetermined time about the aforementioned magnetic-recording medium, and ]  $\Delta tEQ = \exp (\ln(\Delta t) - \beta + \beta_{st})$

It is defined as (the heat fluctuation stability factor to the temperature T of a magnetic-recording medium [ in / each time serration  $\Delta t$  / here / in  $\beta$  ]). Calculate by formula  $tEQ = \sum (\Delta tEQ)$  which adds  $\Delta tEQ$  over the time in which the magnetic-recording medium is held at the temperature to which degradation of record magnetization takes place substantially, and the equivalent degradation time  $tEQ$  is found. The design method of a magnetic recording medium that the stable reserve time  $t_{st}$  of the aforementioned record magnetization and the aforementioned equivalent degradation time  $tEQ$  are characterized by determining the specification of the aforementioned magnetic-recording medium, the aforementioned heating means, and the aforementioned magnetic field impression means so that the relation of  $tEQ < t_{st}$  may be filled.

[Claim 16] The design method of the magnetic recording medium according to claim 15 characterized by defining the temperature to which degradation of record magnetization takes place substantially more than as the temperature which added 1/10 of the temperature gradients of the highest attainment temperature and the room temperature in the temperature profile of the heated magnetic-recording medium to the room temperature.

[Claim 17] Cut fine the aforementioned time and  $\Delta t$  calculates the value  $t_i$  which divided the time in which the magnetic-recording medium is held at the temperature more than the temperature which added 1/10 of the temperature gradients of the highest attainment temperature and the room temperature in the temperature profile of the heated magnetic-recording medium to the room temperature into ten equally. The design method of the magnetic recording medium according to claim 15 characterized by being set as 1ns for 10ns when  $t_i$  is 1 - 10ns,  $t_i$  and  $t_i$  exceed 10ns, and  $t_i$  is less than 1ns.

[Claim 18] The aforementioned  $\Delta tEQ$  is the design method of the magnetic recording medium according to claim 15 characterized by being added in the time after magnetization transition was formed on the arbitrary recording tracks of a magnetic-recording medium.

[Claim 19] The design method of the magnetic recording medium according to claim 15 characterized by for the aforementioned heat fluctuation stability-factor  $\beta_{st}$  being 60 or more, and the stable reserve time  $t_{st}$  of the aforementioned record magnetization being more than for five years.

[Claim 20] The design method of the magnetic recording medium according to claim 15 which the aforementioned heating means is laser, and the aforementioned magnetic field impression means is the magnetic head, and is characterized by adjusting the distance of laser and the record gap of the magnetic head.

---

[Translation done.]